Детская Энциклопедия

3

ДЭ 3

Вещество и энергия

Содержание

И. В. Петрянов
5 К читателям

Н. Н. Семенов
7 Без физики и химии вам не обойтись

Движение и энергия

А. А. Космодемьянский
12 Механика
12 Что такое механика
13 Основные разделы механики
14 Закон параллелограмма сил
15 Законы Ньютона
17 Прямолинейное движение
19 Колебания
20 Движение по окружности
21 Движение в поле тяготения
23 Механика тел переменной массы
28 Специальная теория относительности
30 Значение механики для современной техники

А. Ю. Ишлинский, М. Е. Темченко
32 Волчок
32 Прецессия и нутация волчка
34 Движение точки внутри кругового канала
36 Движение кольца в замкнутом круговом канале
36 Волчок в карданном подвесе
37 Гироскопический момент
37 Гироскоп под действием приложенной к нему силы
38 Почему волчок не падает?
40 «Спящий» волчок
40 Правило прецессии
41 Опыт с вращающимся колесом
41 Двухколесный автомобиль
42 Правило Жуковского
43 Кабрирование и пикирование самолета на вираже
43 Правило Фуко
44 Использование гироскопов в технике

Г. В. Александров
46 Крылатый полет
46 Аппараты легче воздуха
47 Почему летает самолет?
47 Звуковой барьер и тепловой барьер
49 Законы аэродинамики и обтекание крыла
51 Как проверяют результаты расчетов
54 Авиационные двигатели
55 Как выбирают размеры самолета и форму крыла
57 Как управляют самолетом
58 Устойчивость самолета
59 Прочность и безопасность
61 Крылатые ракеты
61 Пути дальнейшего развития авиации

Г. С. Титов
62 Полет в космос
62 Знакомьтесь — «Союз»
65 До старта осталось...
66 Космос — новая стихия
67 Орбита — путь корабля
68 До свидания, Земля!
70 От перегрузки к невесомости
74 Впервые в открытом космосе
75 Земля — с орбиты
75 Три космические скорости
78 Ориентация корабля
78 Коррекция орбиты
79 Закрутка на Солнце
79 Стыковка кораблей
81 Советский Союз — космическая держава
82 Возвращение на Землю

И. В. Петрянов
85 Как вода течет по трубам

А. А. Коробко-Стефанов
104 Звук
104 Как измеряли скорость звука
105 Распространение и отражение звука
106 Звуковая энергия
107 Наше ухо
107 Загадки нашего слуха
109 Что такое громкость
110 Откуда пришел звук?
110 Движение звуковых источников
110 Резонаторы
111 Музыкальные звуки
114 Передача и запись звуков
116 Неслышимые звуки
117 Излучатели ультразвука
118 Эхо помогает водить корабли
118 Звук служит человеку
121 Кавитация

И. Р. Кричевский, И. В. Петрянов
121 Наука, необходимая всем
122 Что такое термодинамика
122 Основные понятия термодинамики
134 Закон термического равновесия
134 Первое начало термодинамики
137 Второе начало термодинамики
144 Энтропия
145 Зачем нужно понятие «энтропия»
149 Третий закон термодинамики

М. П. Малков, И. Б. Данилов
152 На подступах к абсолютному нулю
152 Что такое холод
152 Газ превращается в жидкость
154 Квантовые свойства веществ
154 Сверхпроводимость
156 Сверхтекучесть
157 Квантовые генераторы и усилители
157 Наинизшая температура

Д. С. Циклис
158 Вещество при высоких давлениях
158 Что такое давление
159 Каков предел давления?
159 Как создают давление
159 Какое давление может выдержать аппарат?
163 Полиморфные переходы
164 Давление и химические реакции
165 Что нужно знать, чтобы построить химический завод?
165 Давление и живые организмы
166 Пластичный мрамор
166 Взрывы и землетрясения в лабораториях
167 Наука о высоких и сверхвысоких давлениях

В. И. Кузнецов
167 Волны и кванты
167 Волны
168 Абсолютно черное тело
169 Ультрафиолетовая катастрофа
170 Появление слова «квант»
170 Кванты и электроны
170 Атом Бора

В. Д. Новиков
175 Радиофизика
176 Рождение науки
178 Колебания и резонанс
178 Волны
179 Собственные и вынужденные колебания
180 Шумы и спектры
182 Путешествие по диапазонам частот
183 Сверхвысокие частоты
186 Антенны
187 Квазиоптика
188 Как генерируют радиоволны
189 Радиоволны в атмосфере
191 Радиоспектроскопия
194 Квантовая радиофизика
194 Радиофизике предстоят новые открытия

В. И. Кузнецов
195 Свет
195 Что мы понимаем под словом «свет»
196 Луч и волна
196 Самая большая скорость
197 Окно в мир
198 Микроскопы
201 Телескопы
201 Вещество и свет
202 Тайны стеклянной призмы
204 От призмы к прибору
204 «Линии» химических элементов
205 Дифракционная решетка
206 Как измерили длину световой волны

206 Красный гигант
208 Мир голографии
209 Лазер
212 Световой телеграф
213 Удивительные превращения
214 Каблограмма Рамана
215 Спектры и скорость
216 Световое давление
218 Притягиваются ли телами фотоны?
219 Наука о свете

Г. Я. Мякишев
220 Электричество и магнетизм
220 Электромагнитные взаимодействия
224 Взаимодействие неподвижных заряженных тел. Электрическое поле
227 Как образуется электрический ток
229 Взаимодействие движущихся электрических зарядов
231 Взаимная связь электрических и магнитных полей
237 Электромагнитные волны

238 Удивительный мир твердых тел

Б. Ф. Ормонт
239 Кристаллы

Б. Ф. Ормонт
244 Электронная структура твердых тел

Г. Б. Анфилов
249 Полупроводники
249 Термисторы
250 Полупроводниковые «глаза»
250 Нагреватели и светильники
251 Запирающий слой
251 Выпрямители. Кристаллы и лампы
252 Транзистор
253 Переворот в радиотехнике
254 Электростанция ... на столе
255 Новые холодильники
255 Нагрев вместе с охлаждением
256 Вентильный фотоэлемент
257 Свет работает
257 Полупроводники и жизнь

В. Д. Новиков
258 Звук в твердом теле

В. Д. Новиков
260 Магнитные свойства вещества

Как и из чего вещество построено

А. Б. Мигдал
266 Законы, управляющие Вселенной
266 Закон сохранения энергии
268 Закон сохранения количества движения
268 Что же сохраняется?
269 Закон сохранения странности
270 Почему у людей сердце с одной стороны
272 Всегда ли наблюдается зеркальная симметрия?
274 Антивещество

Д. Н. Трифонов
275 Рождение, жизнь и смерть химических элементов
276 Урановые лучи
277 Полшага до открытия
277 Три вида лучей
278 Металл = газ + газ
280 Упорядоченный хаос
280 Элементы первичные и вторичные
281 Что такое радиоактивность?
282 «Я вижу атом!»
284 Азот превращается в кислород
285 Нейтрон и новая модель атома
286 Цепь великих открытий
288 Искусственные элементы
289 Земная жизнь искусственных элементов
289 Как объясняется радиоактивность современной наукой?
292 Сколько видов радиоактивных превращений существует?
292 Гамма-лучи
293 О нуклонах
294 Маленькая интермедия
294 Почему светят звезды?
295 «Весь мир за пятнадцать минут»
296 Ключ дает технеций
296 От гелия до висмута
297 Рождение и гибель Сверхновых звезд

Е. Н. Бабулевич
298 Атомный реактор
299 Главные трудности
300 Сердце реактора
301 Как избежать взрыва
302 Защита от излучений
303 Что же происходит в реакторе?
304 Заготовка топлива
306 Внимание — эксперимент!
308 Наш первый реактор

Л. А. Арцимович, В. Д. Новиков
312 Плазма и термоядерный синтез
312 Человек и энергия
312 От урана к дейтерию
313 Откуда берется энергия
313 Реакция деления и реакция синтеза
314 Главное — температура
314 Что такое плазма и как ее получить?
315 Физика плазмы
315 Основные свойства плазмы
316 Плазма в магнитном поле
317 От идеи — к ее осуществлению
318 Токамак
319 Время жизни
319 Какая часть пути пройдена?
320 Другие пути
321 А можно ли в принципе построить термоядерный реактор?
321 Это предстоит сделать вам
322 Другие перспективные задачи

И. В. Петрянов
324 Великий закон
325 Открытие Великого закона
326 Как был открыт периодический закон
327 Тайна пустого места
328 Великое предсказание
330 Как оправдались предсказания Менделеева
331 Великое испытание периодического закона
332 Как радиоактивные элементы нашли свои места в таблице Менделеева
336 В чем основа Великого закона
338 Новый смысл и значение атомного веса (атомной массы)
339 Периодический закон — закон строения атома
339 Атом сам рассказывает о своем устройстве
339 В атоме не может быть двух одинаковых электронов
340 Как же все-таки может выглядеть атом?
343 Так на что же похож атом?
344 Закон строения атома
344 Формула атома
344 Причина периодичности в свойствах химических элементов
346 Строение атома и свойства вещества
346 Строение атома и химия
348 Почему водород стоит одновременно в двух клетках таблицы Менделеева?
348 Самая удивительная группа таблицы Менделеева
349 Благородные газы могут вступать в химические соединения
349 Сколько редкоземельных элементов в одной клетке таблицы Менделеева?
351 Как были предсказаны свойства элемента № 72
351 Элементы, созданные человеком, также подчиняются Великому закону
353 Как были открыты трансурановые элементы
357 Заглянем в будущее

И. В. Петрянов
361 Химия Вселенной
361 Химия Земли
361 Химия планет
363 Химия Солнца
365 Химия межзвездного пространства
368 Химия звезд
А. П. Виноградов
370 Кусок Луны
В. И. Кузнецов
374 Вымершие и воссозданные элементы
374 Будет ли новый подъем?
374 Магические числа
375 Новое слово — «сверхэлемент»
375 Космические сверхъядра
376 Космос и дно Океана
377 Из космоса на Землю
379 Возрождение ядерных «бронтозавров»
379 Снова звезды
380 Созидание разрушением
380 Для чего создают и изучают атомные ядра
Г. Н. Флеров, В. И. Кузнецов
380 На краю таблицы Менделеева

Превращения вещества

385 Пять из ста пяти
Д. Н. Трифонов
385 Удивительные элементы
И. Л. Кнуняц, А. В. Фокин
387 Фтор
К. А. Андрианов
392 Кремний
Н. П. Сажин
395 Титан
Д. Н. Трифонов
397 Франций
Д. Н. Трифонов
399 Плутоний
И. В. Петрянов
401 Беседа о самом необыкновенном в мире веществе
401 Что такое вода
406 Свойства воды
Д. Н. Трифонов
417 Химическая реакция
И. В. Петрянов, К. И. Сакодынский
426 Удивительная судьба одного простого открытия
426 Что же открыл профессор Цвет?
427 Что происходит в хроматографической колонне?
428 А если вещество бесцветно?
429 Чем пахнет земляника
429 Колонна длиной ... в полкилометра
430 Хроматография на листе бумаги
431 Хроматография и биохимия
432 Хроматография в борьбе за здоровье человека
433 Тонкослойная хроматография
433 Ионообменная хроматография
433 Хроматография и периодический закон
435 Химия одного-единственного атома
436 Хроматография сегодня...
437 ... и завтра
А. Н. Фрумкин, В. С. Багоцкий
437 Большая задача электрохимии
437 Почему не выгодна тепловая машина
438 Что такое электрохимия
438 Электрохимия в современной науке и технике
439 Энергетика большая и малая
440 Топливные элементы
440 Водородно-кислородный элемент
441 Высокотемпературные топливные элементы
442 Топливные элементы дают ток
П. А. Ребиндер
444 Замечательные явления на границе между телами
444 Молекулы-пограничники
444 Поверхностная энергия
445 Капли на поверхности. Смачивание. Форма жидких тел
446 Адсорбция
447 Как построены молекулы поверхностноактивных веществ
449 Почему мыла моют
451 Пены полезные и вредные
451 От производства полимеров до книгопечатания
454 Путь к прочности — через разрушение
М. И. Кабачник
457 Органические вещества вокруг нас
457 Сколько их?
458 Почему их так много?
459 Органические вещества в живой природе
461 Человек и органические вещества
461 Создание теории строения органических веществ
462 Краски всех цветов и оттенков
463 Органические красители для фотографии и кино
465 Лекарственные вещества
466 Лес — источник органических веществ
466 «Черное золото» — нефть
469 Органические вещества в сельском хозяйстве
К. А. Гладков
471 Полимеры
471 Для чего нужны полимеры
472 Родословная больших молекул
473 Первые искусственные пластмассы
473 Как получают молекулы-гиганты
476 «Швейная фабрика» гигантских молекул
478 Секрет прочности
480 Стекло, кожа или резина?
481 И в огне не горит...
484 У истоков века полимеров
В. А. Каргин
485 Полимеры будущего
485 Полимеры — конструкционные материалы
486 Полимеры в жизни людей
488 Полимеры в медицине и биологии
А. С. Хохлов
489 Химия жизни
489 Из каких элементов состоят организмы
489 Как построены белки
492 Пространственная структура белков
493 Что такое полисахариды
494 Сложное строение полинуклеотидов
495 Нуклеиновая кислота — «нить жизни»
496 Как создается новая молекула белка
498 Что такое мутации
498 Чем опасны вирусы
500 Можно ли искусственно создать живое?
А. Н. Несмеянов
501 Химия пищи
И. В. Петрянов
508 Новое

Справочный отдел

В. И. Козлов
513 Всему миру — одну меру
Г. И. Гуревич
523 Разберемся в размерах
Б. В. Ляпунов
529 Что читать
З. Н. Кожевникова
534 Словарь-указатель

Коммунистом
стать можно лишь тогда,
когда обогатишь свою память
знанием всех тех богатств,
которые выработало
человечество.

В. И. ЛЕНИН

Академия педагогических наук СССР

Детская Энциклопедия 3

Для среднего и старшего возраста

Третье издание

Главный редактор
МАРКУШЕВИЧ А. И.
Члены главной редакции:
АРТОБОЛЕВСКИЙ И. И.
БАННИКОВ А. Г.
БЛАГОЙ Д. Д.
БРУСНИЧКИНА Р. Д.
БУЦКУС П. Ф.
ВОРОЖЕЙКИН И. Е.
ВОРОНЦОВ-ВЕЛЬЯМИНОВ Б. А.
ГЕНКЕЛЬ П. А.
ГЕРАСИМОВ С. А.
ГОНЧАРОВ А. Д.
ГОРШКОВ Г. П.
ДАНИЛОВ А. И.
ДЖИБЛАДЗЕ Г. Н.
ДОЛИНИНА Н. Д.
ДУБИНИН Н. П.
ИВАНОВИЧ К. А.
ИЗМАЙЛОВ А. Э.
КАБАЛЕВСКИЙ Д. Б.
КЕДРОВ Б. М.
КИМ М. П.
КУЗИН Н. П.
КУЗОВНИКОВ А. М.
ЛЕОНТЬЕВ А. Н.
ЛУРИЯ А. Р.
МАРКОСЯН А. А.
МИХАЛКОВ С. В.
НЕЧКИНА М. В.
ПАНАЧИН Ф. Г.
ПЕТРЯНОВ И. В.
РАЗУМНЫЙ В. А.
СКАЗКИН С. Д.
СОЛОВЬЕВ А. И.
ТИМОФЕЕВ Л. И.
ТИХВИНСКИЙ С. Л.
ТЯЖЕЛЬНИКОВ Е. М.
ХАЧАТУРОВ Т. С.
ЦАГОЛОВ Н. А.
ЦАРЕВ М. И.
ЧЕПЕЛЕВ В. И.

Заместитель
главного редактора
КУЗНЕЦОВ А. М.

Издательство
«Педагогика»
Москва 1973

Вещество и энергия

Научный редактор тома
ПЕТРЯНОВ И. В.

03:8 ю
Д 38

Scan- AAW; Processing- waleriy, 2018

Д 0076—038
005(01)—73 подписное издание

© Издательство
«Педагогика» 1973 г.

К читателям

«Счастливого пути вам, путешественники в третье тысячелетие!» Этими добрыми словами старого ученого открывается первый том вашей Детской энциклопедии. Не забывайте их никогда.

Ведь это вам, наши читатели, предстоит прокладывать путь в светлое будущее — в коммунизм. Будьте же к этому готовы. Желаем вам удачи на трудной дороге.

Мы, все те, кто работал над этим томом Детской энциклопедии, твердо уверены, что среди вас, среди сотен тысяч советских ребят, есть замечательные будущие мастера, талантливые конструкторы, инженеры, даже гениальные ученые. Кем-нибудь из них, наверное, станешь и ты — тот, который держит сейчас в руках эту книгу и читает эти строки. Ведь это зависит во многом от тебя.

Как много интересного ждет вас, как много неведомого вы узнаете, как много невиданного увидите, как много сделаете, изобретете и построите!

Сколько новых загадочных тайн природы вам предстоит открыть! Но имейте в виду, что природа не отдает без борьбы свои тайны. Покорять ее может только сильный. И вы, строители будущего, обязаны стать сильными.

Правда, одной только силой такого могучего противника не одолеть. Нужно еще стать смелым и не отступать перед сложным и трудным. Но и этого мало. Придется, кроме того, стать умелым. Нужно научиться умению применять свою силу. Только тогда можно будет рассчитывать на победу в тяжелой борьбе.

В наше время самая могучая сила в мире — знание. И вы должны, обязаны много знать.

Некоторым из вас иногда, наверное, кажется, что наука — удел немногих, избранных. Это заблуждение. Уже в наши дни наука становится могучей производительной силой и грань между наукой и производством стирается быстро. Теперь иной раз прибор ученого-физика, например циклотрон, не отличишь от большого завода. А на многих химических заводах уже и теперь важнейшим цехом становятся электронные счетно-решающие машины, с помощью которых рабочие ведут технологический процесс. Так кто же будет работать на заводах и в лабораториях недалекого будущего — рабочие или ученые? А велика ли между ними будет разница? Ведь и тот и другой — каждый в своей области — должен будет очень много знать. Знание необходимо всем вам, строителям прекрасного будущего. Оно ваша сила.

Но помните, знание тоже может быть разным. Можно вызубрить все правила арифметики и не суметь решить простенькую задачку. Можно затвердить все законы Ньютона и стоять в беспомощном недоумении перед простым станком, не понимая, как он работает. Можно знать назубок все законы физики и не уметь рассчитать или починить обмотку электромотора или дома сделать проводку.

Только знать — мало. Нужно еще уметь применять свои знания. В этом вам поможет математика. Помните, что за значками и буквами ее сложных формул стоят великие логические законы, которым подчиняется все, что совершается в мире.

Не бойтесь выводов, уравнений и формул. Преодолейте их кажущуюся сложность. Тогда они всегда будут вашими друзьями и помощниками. Тот, кто научится свободно пользоваться удивительным языком математики, только тот и сможет допрашивать природу, ставить перед ней вопросы о ее тайнах и понимать ее ответы. А ведь в этом и состоит главная задача. Конечно, это очень трудно. Но чем труднее задача, тем она интереснее. Даже и в этой книге не все для вас сразу будет легким и понятным. Придется проявить настойчивость и упорство, снова и снова возвращаться к иным, особенно сложным, разделам. Не поняли сразу — прочтите еще раз, в конце концов поймете.

Спасибо великим ученым — разведчикам истины за их героический, самоотверженный труд. Для вас они разведали и сделали ясными скрытые и таинственные законы природы. И вам придется потратить немало усилий, чтобы эти законы понять и хорошо усвоить. Это совершенно необходимо, иначе вы не сможете идти вперед. Новые задачи, которые встанут перед вами, будут очень сложны и трудны. Не бойтесь их. Будьте к ним готовы.

Каждая область знания интересна. Каждая специальность важна и необходима. Каждая работа почетна. Пусть одни решат стать строителями или трактористами, других увлечет медицина, третьих — искусство.

Но каждый обязательно выберет для себя ту дорогу в жизни, которая для него самая увлекательная и интересная.

Это — познание вещества, исследование, как и по каким законам оно устроено.

Это — поиск неведомого в глубинах космоса и микромира.

Это — поиск неисчерпаемых источников энергии. Без них не сможет обойтись человек будущего.

Это — разгадка таинственных законов живой природы.

Это — создание новых элементов, новых веществ, новых материалов, новых конструкций, новых машин.

Это — стремление повысить точность измерений, которая расширит границы познания.

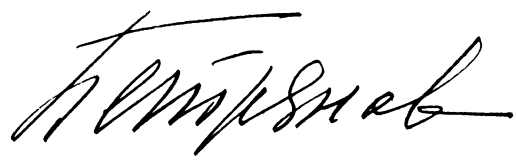
Тяжелый повседневный труд ждет вас на этом пути. Он потребует от вас большой самоотверженности, твердости, упорства, увлечения и преданности. Вас ждут горечь и разочарование, неизбежные заблуждения и ошибки.

Того, кто сумеет развить у себя зоркий взгляд и умение подмечать великое в малом и неведомое в повседневном, того, кто воспитает в себе смелость в постановке проблемы и достижении решения, каким бы безнадежным оно ни казалось, ждет на этом пути великая радость открытия нового, радость победы.

Из того немногого, что рассказано в этой книге об открытиях в науке о веществе нашими великими предшественниками, вы должны понять, какие могучие силы и какие неограниченные возможности вы получили в наследство. Вам открыта дорога в космос. Для вас добыта энергия атома.

От вас зависит, как вы это используете. Великая ответственность за будущее мира лежит на вас. Не забывайте о ней.

Герой Социалистического Труда академик



Без физики и химии вам не обойтись

Здравствуйте, люди будущего!

Нет, мы не оговорились, иначе вас не назовешь. Вы и есть люди будущего — сегодняшние школьники, студенты и специалисты 80-х годов, доктора и академики XXI века. Вам предстоит пользоваться всеми открытиями нашего поколения, завершить все, что мы задумали, затеяли и не довели до конца. Именно вам вручим мы перечень наших надежд, планы наших открытий. Вы будете исполнителями и одновременно редакторами: кое-что вычеркнете, кое-что измените, главное — осуществите. Едва ли можно предугадать, что именно вы откроете, но к чему вы должны стремиться — это можно и нужно сказать сегодня.

Главная задача общеизвестна — дать максимальное количество благ максимальному числу людей, практически — всем. Это и означает осуществить принцип коммунизма: «каждому — по потребностям, от каждого — по способностям». Надо будет удовлетворить все материальные и все духовные потребности каждого человека.

Начнем с материального: прежде всего с пищи. Знаете ли вы, дети Советской страны, что на нашей планете не все едят досыта? Есть страны, где голод не редкость, подавляющее большинство людей недоедает, а многие тысячи умирают от голода. Идеологи капиталистического мира говорят, что тут ничего не поделаешь: планета, дескать, маловата, земли на всех не хватает. Но это неправда. Есть еще земля на нашей планете.

Есть резервы географические. Ведь распахано всего десять процентов суши, девяносто — не приносят плодов. Это сухие степи и пустыни, где мало воды; это пустыни зеленые — болотистые земли, сырые леса и джунгли, где воды многовато; это пустыни белые — снежные и ледяные; это пустыни высокогорные, крутые и каменистые. А кроме всех этих сухопутных пустынь есть еще одна, самая обширная — синяя пустыня — океан, который в 2,4 раза обширнее суши. Еще 361 млн. км^2 не распахано, не засеяно, не возделано.

Есть резервы и агрономические. В технически развитых странах, отнюдь не в самых лучших природных условиях, урожайность раз в пять выше средней. Стало быть, только за счет лучшей обработки, применения удобрений и современных сельскохозяйственных машин можно получать от нашей земли в пять раз больше продуктов.

Есть еще и биологические резервы. Растения вовсе не идеал. Растут они не круглый год, используют далеко не все солнечные лучи, инфракрасные, например, упускают. На суше к. п. д. растений раз в десять ниже, чем в воде. Тут непочатый край работы селекционерам, чтобы улучшать живую природу.

А кроме того, природу можно и вообще подменить. Что, собственно говоря, делают растения? Синтезируют пищу из углерода, кислорода, водорода и других элементов, используя энергию солнечного света. Нельзя ли синтезировать такую же пищу из тех же материалов с помощью электрического тока, угля или нефти? Ученые уже пробуют сделать это. Тогда мы не будем зависеть от размера площадей в производстве продуктов.

Резервов много. Но резервы эти не из числа тех, которые легко взять: подошел и греби лопатой. К ним надо подойти умеючи: сухие пустыни обводнить, болота — осушить, белые пустыни — отеплить, синие как-то преобразовать... А для осушения и обводнения нужны техника, гидравлика, климатология, термодинамика, энергетика — нужны все разделы физики, все разделы химии. Так что без науки тут не обойтись.

И то же самое можно сказать об одежде, строительных материалах, минералах, топливе, энергии. Есть в мире нужда, острая нехватка: есть голод жилищный, голод энергетический, голод минеральный. Резервы есть. Но не так просто к ним подступиться — без открытий и изобретений здесь не обойтись.

Мысленно видим, как разгорелись глаза у юных читателей. Приятно думать, что еще не все до тебя сделано, предстоят открытия во льдах, на океанском дне, в пустынях географических, на целине научной. Есть еще где проявить себя, сделать важные открытия.

Но, может быть, есть и такие среди вас (среди взрослых они попадаются), у которых глаза не загорелись, а потускнели. Читают и ворчат про себя: «А как же нам говорили, что все законы науки давно открыты, технические решения намечены... наше дело только использовать». Очень им хочется прийти в будущее на все готовое, стройными рядами, с большими ложками на плече. Но, надеемся, таких среди вас очень мало.

Дорогие друзья, с глазами загоревшимися ведь мы говорили не только о материальных, но и о духовных потребностях. Вот будете вы сыты, одеты, размещены, обогреты, грязный и скучный труд передадите машинам, обеспечите себя всем необходимым за четыре часа в сутки, а на что у вас пойдут свободные часы?

И тут наука предоставляет вам беспредельные возможности для удовлетворения любознательности, ненасытной жажды знаний, возможности открытий.

Три направления в изучении природы представляются нам самыми увлекательными: изучение самого далекого, самого малого и самого сложного.

Самое далекое — это, конечно, космос. Вам предстоит изучить изъеденную кратерами Луну, посетить Марс и парниковую печь Венеры, большие планеты с их промерзшими лунами, угловатые астероиды, кометы. Вам предстоит исследовать Солнце, околосолнечное и межзвездное прост-

ранство и все бесчисленные звезды, одну за другой. Впрочем, едва ли нужно вам рассказывать, как заманчивы космические путешествия. Мы только напомним, что астронавтика — это комплекс наук: тут и небесная механика, и кинематика, и физика плазмы, тут и астрофизика, и оптика, и термодинамика — словом, почти все разделы физики и химии.

Самое малое — мир атома и внутриатомный мир. Вам предстоит разобраться в свойствах элементарных частиц — нуклонов, мезонов, гиперонов, таинственных нейтрино, резонансов и гадательных кварков. Кто знает, сколько их еще откроют, пока вы будете учиться? Вы будете иметь дело с ничтожнейшими долями микрометра и микросекунды, с исчезающе малыми величинами и исчезающе малыми мгновениями. В малом вы будете искать грандиозное, ибо в недрах атома таятся самые грандиозные энергетические богатства; оттуда приходит термоядерная энергия и полная энергия, заложенная в массе, превосходящая термоядерную более чем в 100 раз.

Мир самого сложного, конечно, жизнь. Сравнительно недавно, в 50-х годах, люди начали разбираться в химической стороне жизнедеятельности. И сразу же изменилось наше отношение к биологии. Прежде считалось: техника давным-давно превзошла живую природу, природа нечто отсталое, устаревшее, слабое, учиться там нечему. Оказалось, что это не совсем справедливо. Да, технические устройства превзошли живое тело по мощности, скорости, прочности, температуре. Но организм превосходит самую совершенную технику необыкновенной слаженностью процессов, ювелирной точностью результатов, экономичностью и рациональностью.

Привычный пример: связывание атмосферного азота. На химических заводах чистый азот, добытый из воздуха при сверхнизких температурах, соединяют с чистым кислородом, выделенным из воды электрическим током. Процесс ведут при высокой температуре и высоком давлении. А клубеньковые бактерии, те, что сидят на корнях бобовых растений, умеют получать связанный азот из обычного атмосферного воздуха при нормальной температуре и давлении.

Интересна и загадка зеленого листа — основного производителя пищи на нашей планете. О том, что зеленый лист изготовляет углеводы из углекислого газа, известно давно. Но вот что важно: лист делает это с помощью световых лучей, которые сами по себе не способны разбить молекулу углекислого газа. Лист накапливает их энергию, являясь как бы энергетической копилкой, удачно решающей проблему концентрации солнечных лучей. Эта проблема важна и для будущих гелиостанций.

А тайна производства белка! Она приоткрылась перед нами в самые последние десятилетия. Выяснилось, что белковые молекулы — это нити, состоящие из аминокислот всего лишь двух десятков видов. Формулы белковых нитей записаны как бы двадцатью литерами, в ином белковом слове десятки тысяч литер: целая брошюра об одной молекуле. Литеры же, в свою очередь, записаны четырьмя знаками, как бы четырьмя звездочками каждая буква, на длиннющих (по молекулярным масштабам), свитых жгутом двойных нитях дезоксирибонуклеиновых кислот. В этих кислотах записана полная информация об организме: форма носа, цвет глаз и волос, строение костей, мышц, сердца, печени, мозга, формула любой молекулы для любого сорта клеток. И организм штампует молекулы с удивительной быстротой и точностью, безошибочно вставляя нужные атомы в нужные места. Если в белковой молекуле поменяются местами хотя бы две аминокислоты, такая замена приводит иногда к неизлечимым заболеваниям: злокачественным опухолям, психическим расстройствам. Значит, как правило, организм не ошибается ни в одной букве.

Попробуйте перенять у природы ее типографское искусство, научитесь изготовлять нужные молекулы любой сложности при обыкновенной температуре. Разгадайте шифр организма — запись наследственных признаков, научитесь печатать гены по заказу, регулировать наследственность, проектировать породы и виды в перспективе.

Право же, достаточное количество увлекательных проблем оставлено на вашу долю, ученые XXI века!

У энтузиастов загорелись глаза... «Эх, скорее бы вырасти!» — думают они. А некоторые вздыхают с облегчением: «Вот и прекрасно! Для желающих есть проблемы на переднем крае, а для нежелающих нет никаких проблем. Мы обойдемся без науки».

Нет, не обойдетесь!

Чтобы люди не соскучились и не разленились, природа приготовила два каверзных правила.

Правило первое: дальние путешествия не обходятся без пересадок. Вы это правило знаете из житейской практики: выйдя из дома, до остановки троллейбуса идете пешком, потом подъезжаете к станции метро, на метро до вокзала или до аэровокзала, автобусом до самолета...

Зависят эти пересадки от скоростей. Для больших расстояний нужны большие скорости, для малых — малые. От дома до угла не полетишь на ракете, это нерационально и практически невозможно.

Вся история техники была путешествием с пересадками. В транспорте: собственные ноги — лошадь — паровоз — самолет — космическая ракета, в будущем для межзвездных перелетов — фотонная предполагаемая ракета.

Ступени эти зависят и от расстояний, и от скоростей, и от грузов: на лошадях не перевезешь столько, сколько перевозят поезда.

Ступени в энергетике: дрова, уголь и нефть. Ступени также зависят от объема. Дров на планете не хватит, чтобы заставить работать тепловые машины всех заводов. Но, сжигая горы угля и озера нефти, человечество все же испытывает энергетический голод. В среднем на одного жителя планеты приходится 0,1 кВт. Эта десятая доля никак не может избавить людей от самого грубого физического труда: от пахоты на волах, от копания земли лопатой. Чтобы довести энерговооруженность отсталых стран до уровня Советского Союза, нужно увеличить ее раз в десять, а то и больше. Возможен ли такой скачок? В принципе возможен. За годы Советской власти выработка энергии в нашей стране поднялась в сотни раз.

Но запасы угля и нефти исчерпаемы, и далеко не все страны так богаты ископаемыми, как наша. Стало быть, в не очень отдаленном будущем придется решать проблему источников энергии. Резервы у планеты есть: энергия ветра, приливов, солнечных лучей, тепло недр и, наконец, неисчерпаемая термоядерная энергия.

Вода, оказывается, самый щедрый из всех имеющихся у нас в резерве источников энергии. Она состоит, как известно, из водорода и кислорода, а в водороде на каждые 6700 обычных атомов приходится один атом дейтерия — тяжелого водорода. Один же грамм дейтерия, превращаясь в гелий, может дать столько же энергии, сколько 10 т угля. Ручьи энергии в каждом ручье, реки энергии в реках, в океане — целый океан. Энергии тут хватит на что угодно: и горы расплавить, и растопить полярные льды, и улучшить климат на всей планете.

Резервы есть, но как к ним подступиться? Термоядерные реакции начинаются при температурах в десятки миллионов кельвинов; любая термоядерная печь превратится в пар от этакой растопки. Как же обезопасить печь от испарения? Ученые предложили удерживать это топливо на весу магнитным полем. Советская установка Токамак по виду похожа на баранку, по оси этой баранки вспыхивает кольцо плазменного шнура, надежно укутанное магнитным одеялом. Система эта постепенно набирает мощность. Пока шнур вспыхивает только на малую долю секунды, но, когда продолжительность его вспышки или температура увеличатся еще порядка на три, термоядерная печь заработает...

И термоядерная энергия станет для вас так же доступна, как ... вода.

Подождите ликовать. Вам придется иметь дело еще и с другим правилом каверзной природы.

Правило второе: в природе все находится в подвижном равновесии. Каждый шажок слегка нарушает равновесие, большие действия нарушают уже заметно. Один костер и одна печь не влияют на климат — велика ли порция их тепла! О нерадивых хозяевах говорят пренебрежительно: «Дверь настежь, улицу надумал топить». Но в больших городах общими усилиями строителей и отопителей улицы действительно обогреваются. Москва, например, зимой как бы сдвинута на юг километров на двести. Когда же вы запустите тысячи термоядерных печей, это может почувствовать вся атмосфера планеты.

Мельком мы говорили об отеплении полярных стран. Но если растопить ледник Гренландии, уровень морей поднимется метров на десять, затоплены будут все порты. Сама Гренландия приподнимется, станет высокогорной страной. Климат в Америке станет прохладнее, а потом жарче и суше. Так что свою деятельность в энергетике вам придется увязывать с климатологией, океанологией, геологией, техникой, экономикой и еще десятками наук.

Так во всех больших делах.

Вы получаете от нас в наследство сложный мир со сложными, запутанными связями: сложную природу, сложного человека со сложными отношениями, сложную технику, сложную планету со сложным климатом, — и во всем этом вам придется разбираться, распутывая сложности физических, биологических, гуманитарных, социальных закономерностей.

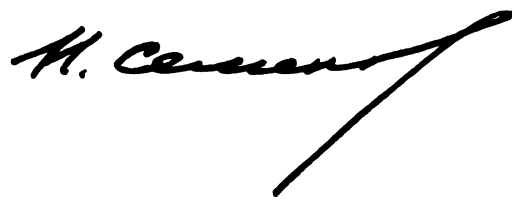
И без науки вам не обойтись.

Вам будет очень трудно, но и ... захватывающе интересно. Скажем вам по секрету ... и даже вслух: самое увлекательное из занятий — это распутывание клубков, сочиненных природой. И самое приятное, что есть в жизни, — торжество ума над путаницей, тот день и час, когда после долгой кропотливой работы вы одержали победу, поняли, как там все устроено. И вы сумеете, наконец, сами собрать, свинтить и придумать не хуже, если не лучше, чем в природе.

И тут без науки вам не обойтись.

Жалко будет, если вы упустите эту творческую радость.

Герой Социалистического Труда академик



Движение и энергия

Механика

Кто незнаком с законами движения, тот не может познать природы.

Галилей

Что такое механика

Первое, что мы наблюдаем во внешнем мире начиная с рождения,— это различные формы движения и взаимодействия материи. Самая простая форма движения — *механическое движение*. Мы понимаем под механическим движением изменение положения какого-либо тела относительно других тел с течением времени. Движение всегда есть результат взаимодействия между телами или частицами тел. Механические взаимодействия вызывают перемещения тел в пространстве или изменение формы тел (деформацию). Наука, изучающая основные законы механического движения и взаимодействия тел, называется *механикой*.

При изучении механического движения твердых тел учитываются только два важнейших признака материального тела: *протяженность* (или геометрическая форма движущегося тела) и *вещественность* (масса тела и ее распределение в данном геометрическом объеме). *Твердым телом* в механике называют такое тело, расстояния между любыми частицами которого во все время движения остаются неизменными. При изучении механических движений обычно не учитываются изменения других признаков реальных тел, например тепловых, электрических свойств. Так, изучая движение артиллерийского снаряда, можно пренебречь нагреванием его металлической оболочки вследствие трения о воздух. Однако опыт, полученный из наблюдений и измерений скоростей при вхождении метеоров в атмосферу Земли, а также изучение движения космических кораблей, входящих в атмосферу Земли со скоростями более 8 км/с, показывают, что при высоких температурах нагрева оболочки уже нельзя пренебрегать влиянием этого нагрева.

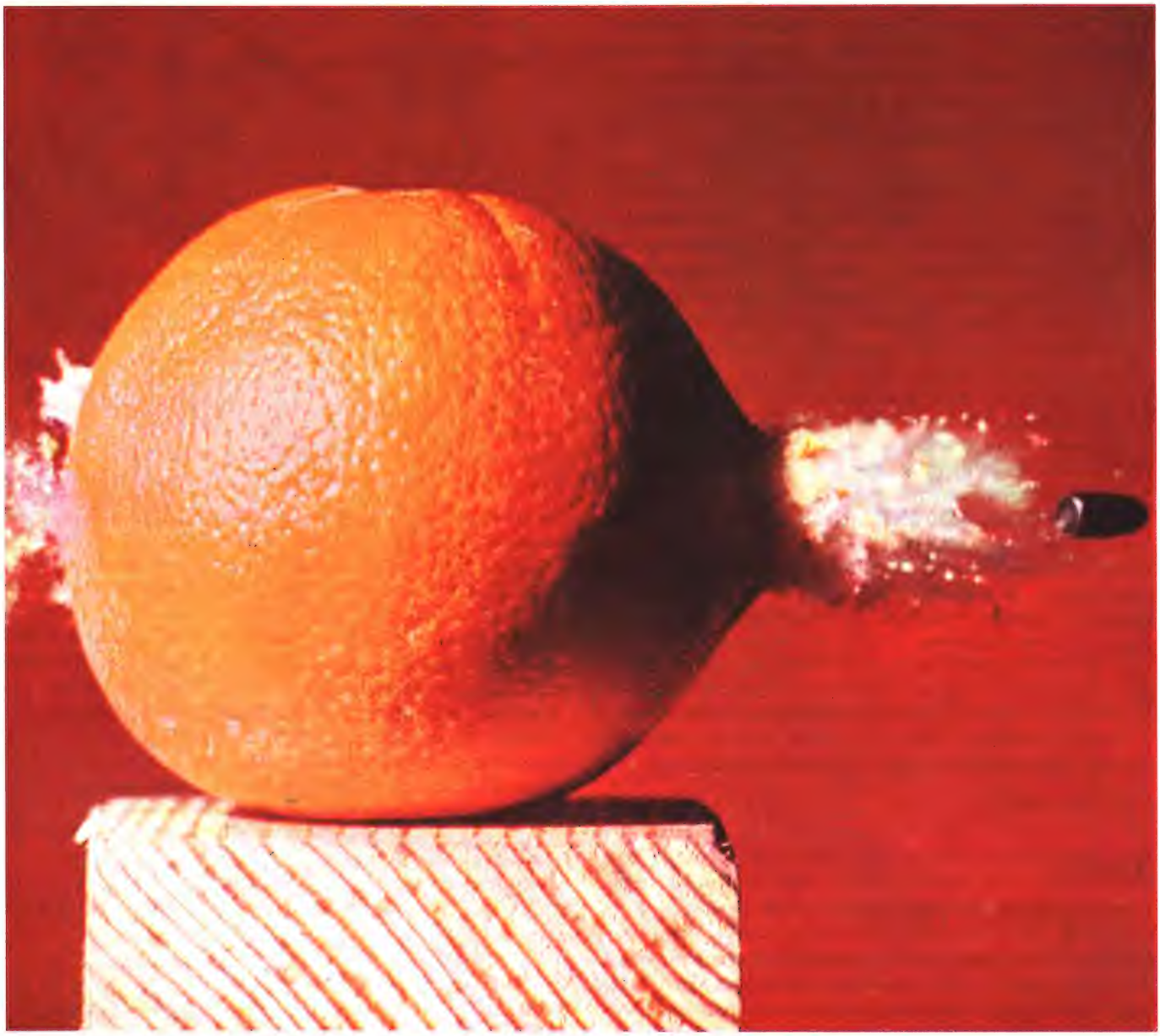
Основной величиной, характеризующей механическое движение, является количество движения. Эту величину можно определить по формуле:

$$q = m \cdot v, \qquad (1)$$

где q — количество движения, m — масса тела, v — его скорость (мы предполагаем при этом, что тело движется поступательно, т. е. скорости всех точек тела в любой момент движения одинаковы).

Механические взаимодействия между телами приводят к изменению количества движения этих тел и осуществляются или непосредственным кон-

Пуля пробила апельсин. Уменьшилась ли ее скорость и насколько? Почему пуля не отскочила от апельсина, а апельсин не отскочил от пули? Почему апельсин не разлетелся на куски, а пуля пробила в нем лишь небольшое отверстие? Изменилась ли температура пули при прохождении сквозь апельсин? Изменилась ли температура апельсина? Каких размеров должен быть апельсин, чтобы пуля завязла в нем? — с подобными вопросами ученым и инженерам приходится сталкиваться очень часто. Ответить на них поможет современная механика.



тактом (тепловоз толкает вагон, книга давит на стол), или дальнодействием (Земля притягивает камень, Солнце притягивает Землю). *Величина, являющаяся мерой механического взаимодействия материальных тел или частиц, из которых состоит тело, называется в механике силой.* В результате механического взаимодействия будет изменяться количество движения. Сила в механике измеряется изменением количества движения тела. Поэтому часто говорят, что основная задача механики — изучение движения материальных тел под действием сил.

Основные разделы механики

Статика — раздел механики, в котором изучаются различные системы сил, действующие на твердое тело, определяются способы, при помощи которых можно заменить данную сложную реальную систему сил другой, существенно более простой системой, эквивалентной по механическому воздействию на

тело. Важной задачей статики является нахождение необходимых и достаточных условий равновесия тел под действием произвольных систем сил.

Кинематика — раздел механики, в котором изучается движение материальных частиц и материальных тел с чисто геометрической стороны, без учета сил, которые могут изменять характеристики механического движения. В кинематике движущиеся объекты различаются только геометрической формой и положением в пространстве. В процессе исторического развития механики кинематические вопросы долгое время не изучались самостоятельно и являлись частью динамики.

Динамика — раздел механики, в котором изучаются законы движения материальных частиц и материальных тел под действием сил. Динамика является наиболее важной частью механики.

Законы механического движения подтверждаются опытом. Так, например, по законам Кеплера движутся планеты, искусственные спутники Земли и шарик на нити. Механика учит не только видеть мир, но и понимать его. Знание законов классической и современной механики позволяет научно предвидеть протекание процессов механических движений в новых задачах, возникающих при развитии науки и техники. Одной из важнейших сторон подлинной науки является именно возможность предвидения. В современной инженерной практике эскизные и технические проекты, разрабатываемые в конструкторских бюро, по сути дела и показывают эту действенную силу научного мышления.

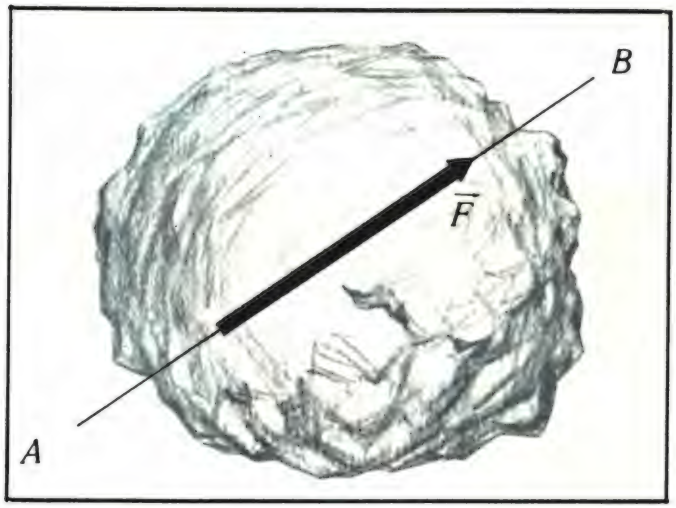
Закон параллелограмма сил

Изучаемые в механике физические величины можно разделить на два класса: *скалярные* и *векторные*. Скалярные величины полностью характеризуются их численным значением. К таким величинам можно, например, отнести площадь, объем, плотность и др. Векторные величины характеризуются не только их значением, но и направлением в пространстве.

Сила и скорость — величины векторные. Графически векторные величины изображаются стрелкой. Длина отрезка при выбранном масштабе дает величину (модуль) вектора, стрелка показывает направление действия вектора.

На рисунке 1 изображен вектор силы. Векторы обозначают латинскими буквами со стрелкой на-

Рис. 1.



верху. Так, на рисунке 2 буквами $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ показаны три силы, действующие на тело так, что их точки приложения совпадают. Те же буквы без стрелок обозначают численные значения сил.

Важнейшим законом, которому подчиняются силы, является *закон независимого действия сил*. Этот закон основывается на многочисленных опытах, и его можно формулировать так: действие каждой из приложенных к телу сил (например, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$) не зависит от того, находится это тело в покое или в движении, и не зависит от числа действующих сил. Действие любой силы данной системы сил не зависит от действия других сил.

Следствием закона независимого действия сил является правило сложения двух сил. По существу это правило сложения векторов. Чтобы сложить два вектора, выбирают подходящий масштаб и вычерчивают их в этом масштабе из одной точки, а затем строят на складываемых векторах параллелограмм (рис. 3). Тогда сумма векторов будет изображаться диагональю параллелограмма, соединяющей исходную точку с противоположной вершиной. Векторную сумму сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ называют *равнодействующей* R_{12} этих сил. Математически векторное сложение сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ можно записать так:

$$\vec{R}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Если угол между $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ обозначить α, то по теореме косинусов из треугольника OAC мы легко найдем значение равнодействующей:

$$|\vec{R}_{12}| = R_{12} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}. \qquad (2)$$

В частном случае, когда $\alpha = 0$ (силы направлены по одной прямой в одну сторону),

$$R_{12} = F_1 + F_2. \qquad (3)$$

Если $\alpha = \pi$ (силы направлены по одной прямой в разные стороны), тогда

$$R_{12} = F_1 - F_2. \qquad (4)$$

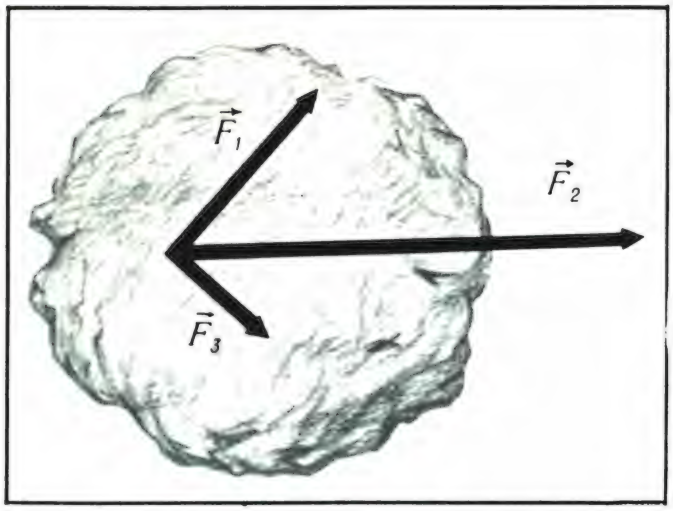


Рис. 2.

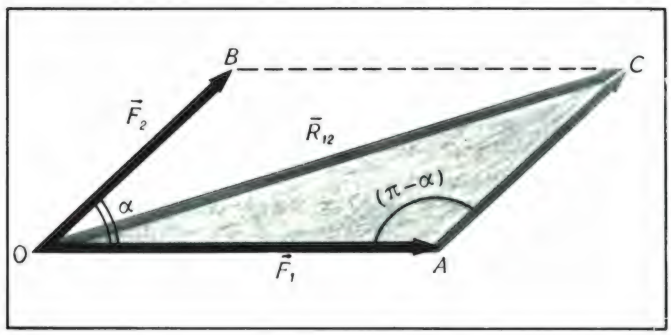


Рис. 3.

Законы Ньютона

Рассмотрим тело, размерами которого можно пренебречь при изучении его движения. Такое тело будем называть *материальной точкой*. По отношению к кинематическим характеристикам (траектория, скорость, ускорение) материальная точка может рассматриваться как геометрическая точка, но по отношению к действующим силам она ведет себя как материальное тело. Основные законы движения были сформулированы Ньютоном так (он имел в виду поступательное прямолинейное движение тел):

ПЕРВЫЙ ЗАКОН. *Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.*

Этот закон называется *законом инерции*, и впервые он был открыт еще Галилеем. Сущность этого закона заключается в том, что механическое движение не может возникнуть из ничего, а только в результате воздействия тел. Изолированная материальная точка или находится в покое, или движется прямолинейно и равномерно, сохраняя неизменным свое движение. Движение этой точки не может исчезнуть и превратиться в ничто, а может быть передано другой точке (телу) или перейти в другую форму движения, например в теплоту.

Изменение количества движения точки может произойти только в результате взаимодействия с другими телами, т. е. под действием силы. Стремление материальной точки сохранить свою скорость обнаруживается в том, что при встрече точки с препятствием она производит на него давление тем большее, чем больше масса точки и чем больше ее скорость.

Следует подчеркнуть, что *движение по инерции есть прямолинейное и равномерное движение.* Иногда неправильно говорят о движениях по инерции автомобиля или ракеты после выключения двигателя, так как обычно эти движения происходят с переменной скоростью, т. е. под действием сил (тяготения, трения и т. п.).

ВТОРОЙ ЗАКОН. *Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.*

Второй закон Ньютона можно представить математически в следующем виде:

$$\frac{\Delta (mv)}{\Delta t} = F, \qquad (5)$$

где $\Delta(mv)$ — приращение количества движения за время Δt.

Если масса точки постоянна, то из уравнения (5) получим:

$$m\frac{\Delta v}{\Delta t} = ma = F, \qquad (6)$$

т. е. *произведение массы материальной точки на ее ускорение равно действующей силе.*

Уравнение (6) называют основным законом динамики материальной точки. Сила F, представляющая собой эффект взаимодействия данной точки с другими телами или точками, является фактором, изменяющим количество движения. Массу, характеризующую инерционные свойства тела в соответствии с формулой (6), называют *инертной массой.*

Если действовать данной силой F на разные точки с массами m_1, m_2, ..., m_k, то при сохранении направления силы получим из уравнения (6):

$$F = m_1a_1 = m_2a_2 = \ldots = m_ka_k. \qquad (7)$$

Соотношения (7) показывают, что инертная масса данного тела определяется отношением силы, действующей на тело, к созданному этой силой ускорению.

Чтобы установить связь силы тяжести с массой, нужно исходить из хорошо проверенного экспериментального факта: сила тяжести, действующая на тело, пропорциональна его массе. Сила тяжести P

сообщает всем телам в данной точке земной поверхности одинаковое ускорение свободного падения: $g_0 = 9{,}81$ м/с^2, а поэтому

$$P = mg_0.$$

Таким образом, на Земле сила тяжести P, действующая на тело, определяется как произведение массы тела m на ускорение свободного падения g_0. Входящая в эту формулу масса называется *гравитационной массой* (от слова «гравитация» — тяготение).

Следует иметь в виду, что благодаря суточному вращению Земли вокруг своей оси, проходящей через Южный и Северный полюсы, ускорение g_0 и сила тяжести P, действующая на тело массой m, изменяются при изменении положения тела на земной поверхности. Измерения ускорения свободного падения g_0 на поверхности Земли показали, что

на экваторе	$g_0 = 9{,}780$ м/с^2;
на средних широтах	$g_0 = 9{,}806$ м/с^2;
на полюсе	$g_0 = 9{,}832$ м/с^2.

Следовательно, максимальное изменение ускорения g_0 при перемещении от полюса до экватора будет примерно 0,5 %. Однако гравитационная масса тела, т. е. отношение $\frac{P}{g_0}$, остается постоянной, не зависящей от положения на поверхности Земли. Возможность определения силы тяжести через массу подтверждается практическим опытом человечества и тончайшими экспериментами ученых начиная с Ньютона.

Гравитационная масса тела не будет изменяться и при переносе его с Земли на другую планету, в то время как сила тяжести тела может изменяться весьма значительно. Тщательные измерения, проведенные на Земле, показывают, что *инертная масса равна гравитационной*. В наши дни летчики-космонавты практически проверили и первый и второй законы Ньютона в условиях невесомости, т. е. в условиях, трудно реализуемых в обычных земных экспериментах. И в этих условиях *гравитационная масса равна инертной*. Масса тела есть в сущности одно из первичных свойств, несводимых к каким-либо другим. Масса характеризует материальность тела и является физической величиной, выражающей одновременно гравитационные и инертные свойства материальных тел.

Равенство инертной и тяжелой масс является экспериментальным фактом, проверенным с высокой степенью точности. Эйнштейн в 1913 г. обратил особое внимание на этот факт и положил его в основу своей теории тяготения — общей теории относительности. В рамках механики Ньютона равенство инертной и тяжелой масс не объясняется, но принимается как результат точных экспериментов.

Формулировки первого и второго законов Ньютона относятся к некоторой неподвижной системе координат, выбор которой связан с принципиальными трудностями. В самом деле, действующая на точку сила определяется взаимодействием с другими телами и, следовательно, существенно зависит от относительного расположения этих тел. Если относительное расположение взаимодействующих тел и точек дано, то значение и направление действующей на материальную точку силы не будет зависеть от выбора системы координат, а полностью определится расположением тел в пространстве. Но по второму закону Ньютона сила равняется произведению массы на ускорение, причем ускорение точки зависит от выбора системы координат. Следовательно, уравнение

$$ma = F$$

может иметь место только по отношению к одной, специально выбранной системе координат. Эта система координат называется *инерциальной* или *абсолютной системой отсчета*. Только при условии хотя бы приближенного существования этой системы имеет смысл и первый закон Ньютона, так как для изолированной материальной точки в однородном и лишенном материи пространстве нельзя отличить состояние движения от состояния покоя.

Какая же система координат должна быть принята за абсолютную? Так как абсолютно неподвижных тел в природе не существует, то мы можем выбрать основную систему только приближенно. В большинстве задач динамики, имеющих приложение к техническим проблемам, основную систему координат можно связывать с Землей, считая ее неподвижной. Весьма большое число экспериментов, поставленных для проверки результатов, вытекающих из второго закона Ньютона, показывает, что принятие земной абсолютной системы не противоречит закономерностям наблюдаемых движений. Однако для астрономических задач и задач космических полетов принятие такой инерциальной системы будет уже неверным, так как Земля вращается вокруг своей оси и движется вокруг Солнца. Для наблюдений за движением планет и космических кораблей в качестве основной системы можно принять систему, связанную с неподвижными звездами. С усовершенствованием методов теоретических и экспериментальных исследований система координат, связанная с неподвижными звездами, также оказалась недостаточной для согласования опытных фактов с результатами вычислений. Это было выяснено Эйнштейном. Созданная им специальная

теория относительности показала, что законы Ньютона не вполне точны и при больших скоростях движения, сравнимых со скоростью света, являются только первым приближением для описания наблюдаемых движений. При скоростях же, значительно меньших скорости света, все расчеты, вытекающие из законов Ньютона, в предположении, что основная система координат связана с неподвижными звездами (иногда даже с Землей), достаточно просты и удовлетворяют самым строгим требованиям точности. Применение методов специальной теории относительности Эйнштейна к изучению движения тел со скоростями, существенно меньшими скорости света, нецелесообразно, так как уравнения движения значительно усложняются, а поправки к выводам классической (ньютоновой) механики ничтожно малы. Но при больших скоростях (например, при движении электронов в ускорителях элементарных частиц) законы Ньютона уже неприменимы, и необходимо пользоваться выводами теории относительности.

ТРЕТИЙ ЗАКОН. *Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе: взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.*

«В самом деле,— говорит Ньютон в пояснение этого закона,— если что-либо давит на что-нибудь другое или тянет его, то оно само этим последним давится или тянется. Если кто нажимает пальцем на камень, то и палец его также нажимается камнем». Если какое-нибудь тело, ударившись о другое тело, изменяет его количество движения на сколько-нибудь, то и оно претерпит от второго тела в своем собственном количестве движения то же самое изменение, но обратно направленное, ибо давления этих тел друг на друга во время контакта равны.

Первый и второй законы Ньютона сформулированы по отношению к материальной точке. Третий закон Ньютона является основным для механической системы точек. Нужно только отметить, что действие и противодействие не образуют уравновешенной системы сил, так как действие приложено к одному телу, а противодействие — к другому. По этой причине как действие, так и противодействие может вызвать движение тел, к которым оно приложено. Рассмотрим, например, камень, падающий под действием силы притяжения Земли: сила противодействия в данном случае будет приложена к Земле. Сила, с которой Земля притягивает камень, в точности равна силе, с которой камень притягивает Землю. Действие вызывает движение камня, противодействие — движение Земли. Так как масса камня ничтожна по сравнению с массой Земли, то и смещение Земли ничтожно и не может быть измерено современными приборами; перемещение же камня обнаруживается без специальных инструментов, простым глазом.

Прямолинейное движение

Пользуясь вторым законом Ньютона, исследуем простейшие случаи прямолинейного движения материальной точки. Если равнодействующая приложенных к точке сил равна нулю, то точка будет находиться в состоянии покоя, или равномерного прямолинейного движения:

$$v = \text{const} = v_0,$$

где v_0 — скорость точки в начальный момент времени (при $t = 0$). Если по оси абсцисс откладывать время t, а по оси ординат скорость, то легко понять, что графиком скорости будет прямая, параллельная оси времени (рис. 4). Элементарный отрезок пути $\Delta S = v_0 \Delta t$. Путь за время t можно найти суммированием ΔS. Следовательно,

$$S = \Sigma \Delta S = \Sigma v_0 \, \Delta t = v_0 \Sigma \, \Delta t = v_0 t, \qquad (8)$$

где Σ — знак суммирования.

Рассмотрим случай равнопеременного (равноускоренного или равнозамедленного) движения или движения с постоянным ускорением (случай, когда ускорение точки $a = \text{const} = a_0$). График ускорения будет изображаться прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 5). Элементарное приращение скорости за время Δt будет

$$\Delta v_1 = a_0 \, \Delta t,$$

а следовательно,

$$v_1 = \Sigma a_0 \, \Delta t = a_0 \Sigma \, \Delta t = a_0 t.$$

Если в начале движения (при $t = 0$) точка имела скорость v_0, то полная скорость будет равна сумме $v_0 + v_1$, т. е.

$$v = v_0 + a_0 t. \qquad (9)$$

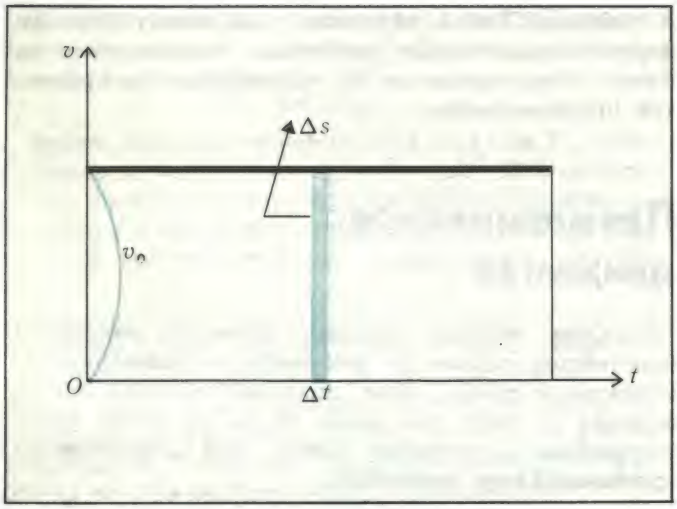
График скорости (для определенности — равноускоренного движения, т. е. для $a_0 > 0$) будет представлять прямую линию, наклоненную к оси абсцисс под углом, тангенс которого равен $a_0 (\text{tg}\alpha = a_0)$. Элементарный путь ΔS будет подсчитываться по формуле

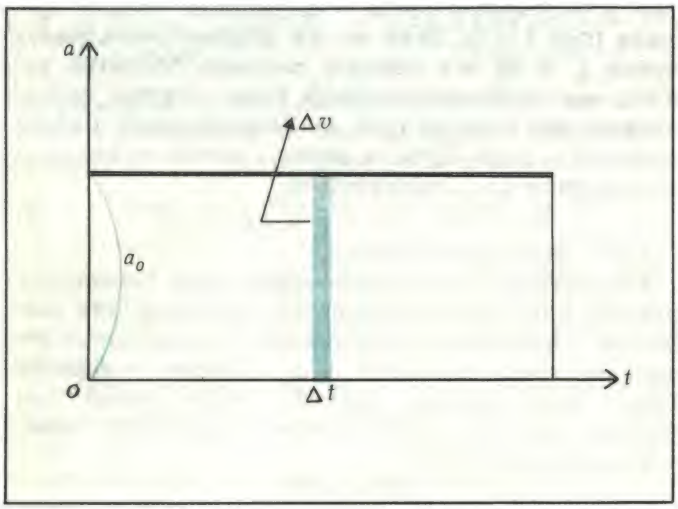
$$\Delta S = v \Delta t$$

и будет изображаться на рисунке 6 голубым столбиком. Пройденный точкой путь $S = \Sigma \Delta S$ будет представлять собой площадь трапеции $OCAB$. Эту площадь можно вычислить, прибавляя к площади пря-

Рис. 4. График скорости ($v=v_0$).

Рис. 5. График ускорения ($a=a_0$).





моугольника $OCDB$ площадь треугольника CAD. Следовательно,

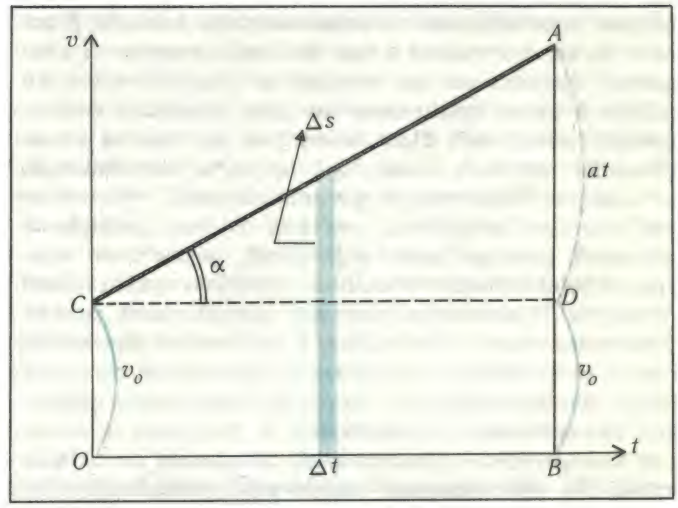
$$S=v_0t+\frac{1}{2}(a_0t)\cdot t=v_0t+\frac{1}{2}a_0t^2. \qquad (10)$$

Весьма полезная формула для вычисления пути S получится, если мы воспользуемся общеизвестной формулой для площади трапеции:

$$S=\frac{1}{2}(AB+OC)\cdot CD=\frac{1}{2}(v_0+v)\cdot t. \qquad (11)$$

Для дальнейшего полезно ввести понятие работы силы. Так как мы рассматриваем только прямолинейные движения, то для этих случаев элементарную работу определяют как произведение силы на элементарное перемещение. Если направление силы совпадает с направлением элементарного перемещения, то элементарная работа будет положительной; если направления элементарного перемещения и

Рис. 6.



силы противоположны, то работа будет отрицательной. Работа силы на конечном участке пути находится суммированием элементарных работ. Если сила постоянна, то суммирование элементарных работ легко провести. Подсчитаем работу силы тяжести $P=mg_0$ при падении тела (точки) с высоты h (рис. 7). Элементарная работа будет $\Delta A=P\Delta h=$ $=mg_0\Delta h$. Работа силы P на пути h определится так:

$$A=\Sigma\Delta A=\Sigma P\,\Delta h=P\Sigma\,\Delta h=Ph=mg_0h. \qquad (12)$$

Таким образом, при падении тела (точки) с постоянной массой под действием силы тяжести работа равна произведению этой силы на высоту, с которой тело падало.

Рассмотрим закономерности движения в однородном поле силы тяжести. В этом случае действующая сила будет $P=mg_0=\text{const}$. Из второго закона Ньютона следует, что движение точки будет равноускоренным с ускорением

$$a=g_0=\text{const}.$$

Пусть материальная точка массы m начинает падать из точки O, расположенной на высоте h_0, имея при этом начальную скорость, равную v_0; на высоте $h_1<h_0$ скорость точки будет v_1. Определим зависимость между v_0 и v_1. Пользуясь формулами равноускоренного движения, имеем:

$$S=h_0-h_1=v_0t+\frac{1}{2}g_0t^2, \qquad (13)$$

$$v_1=v_0+g_0t. \qquad (14)$$

Из формулы (14) определим $t=\frac{v_1-v_0}{g_0}$ и подставим в формулу (13). После простых преобразований получим:

$$\frac{v_1^2}{2}-\frac{v_0^2}{2}=g_0(h_0-h_1). \qquad (15)$$

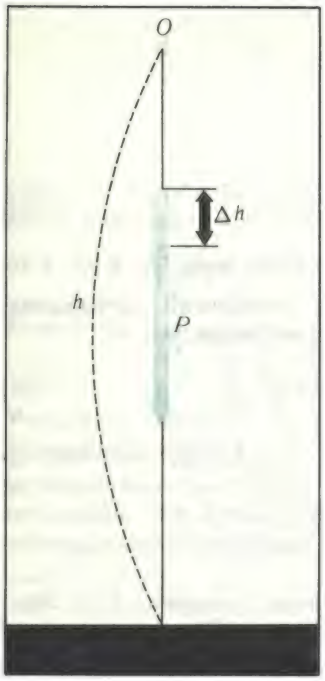
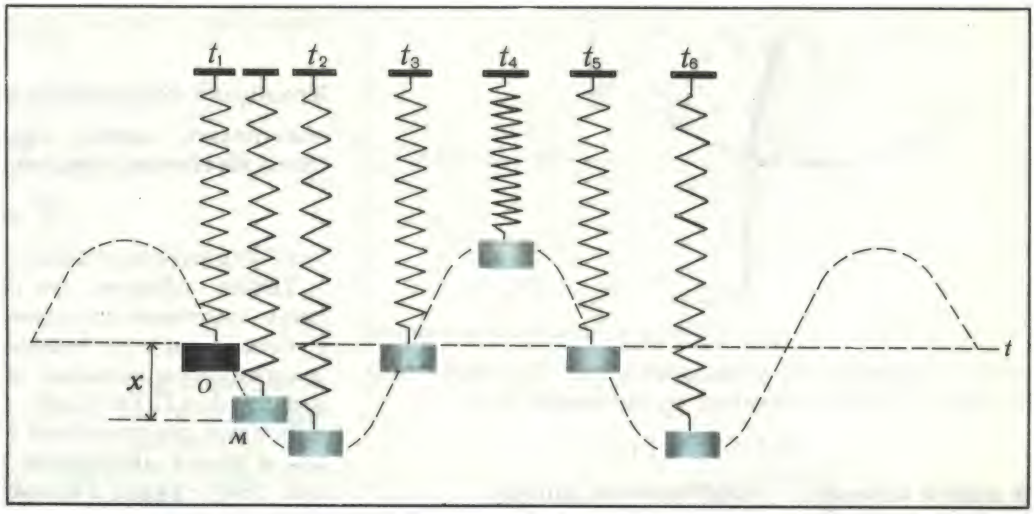


Рис. 7.

Рис. 8.



Умножим правую и левую части соотношения (15) на массу точки m:

$$\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = mg_0(h_0 - h_1). \qquad (16)$$

Величина, равная половине произведения массы точки на квадрат ее скорости, называется *кинетической энергией точки*. Формула (16) представляет один частный случай теоремы об изменении кинетической энергии. Полученный результат можно сформулировать так: изменение кинетической энергии материальной точки, движущейся в однородном поле силы тяжести, равняется работе силы тяжести на пройденном пути: $S = h_0 - h_1$. Формулу (16) можно переписать в виде:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mg_0h_1 = \frac{mv_0^2}{2} + mg_0h_0 = \text{const}. \qquad (17)$$

Величину $Ph_1 = mg_0h_1$ называют *потенциальной энергией материальной точки на высоте* h_1 и соответственно $Ph_0 = mg_0h_0$ — *потенциальной энергией на высоте* h_0.

Формула (17) утверждает, что при движении материальной точки в однородном поле силы тяжести сумма кинетической и потенциальной энергий точки есть величина постоянная. *Это закон сохранения механической энергии точки.* Закон сохранения механической энергии справедлив и для некоторых переменных сил, например для гравитационной силы, изменяющейся обратно пропорционально квадрату расстояния до притягивающего центра, а также для силы упругости, подчиняющейся закону Гука (сила прямо пропорциональна отклонению от положения равновесия).

Колебания

Весьма важный случай движения представляют гармонические колебания. В большинстве случаев гармонические колебания возникают при действии упругой силы, подчиняющейся закону Гука. Рассмотрим в качестве простейшего примера колебания груза, подвешенного на пружине (рис. 8). Начало координат возьмем в положении равновесия груза. Если отклонить груз на расстояние $OM = x$, то возникнет сила $F = kx$, которая будет стремиться возвратить груз в точку O; часто эту силу называют восстанавливающей, а коэффициент k — коэффициентом жесткости пружины. Согласно второму закону Ньютона,

$$ma = -kx,$$

или

$$a + \frac{k}{m}x = 0. \qquad (18)$$

Если обозначить $\frac{k}{m} = n^2$, то решение уравнения (18) можно представить в виде:

$$x = x_0 \cos(nt), \qquad (19)$$

где x_0 есть максимальное отклонение груза (OM_0) от положения равновесия. Предположим, что в начале движения (при $t = 0$) $x = x_0$, а начальная скорость была равна нулю. Величина x_0 называется *амплитудой колебаний*, а (nt) — *фазой колебаний*. Движение, определяемое законом (19), будет периодическим. В самом деле функция $f(t)$ называется периодиче-

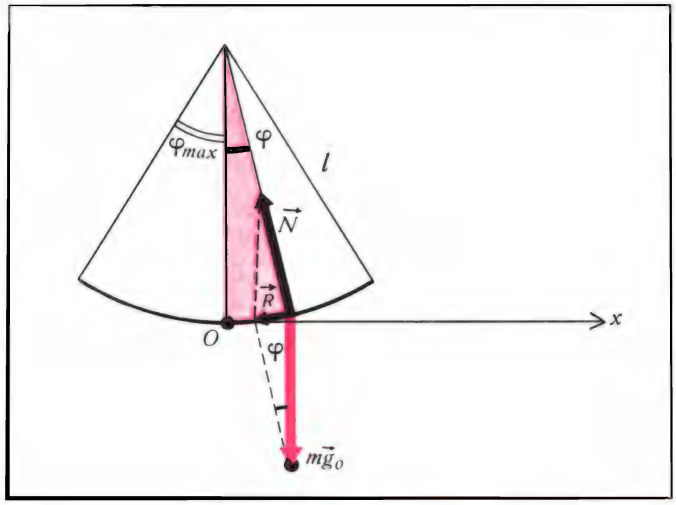


Рис. 9.

ской, с периодом T, если, прибавляя T к аргументу функции, мы не изменяем ее значения, т. е.

$$f(t+T)=f(t).$$

В нашем случае из уравнения (19) имеем:

$$x_0\cos[n(t+T)]=x_0\cos(nt). \qquad (20)$$

Равенство (20) будет иметь место, если $nT=2\pi$ и, следовательно,

$$T=\frac{2\pi}{n}=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (21)$$

Формула (21) показывает, что период гармонических колебаний не зависит от амплитуды x_0, а определяется массой колеблющегося груза и коэффициентом жесткости k. Таким образом, будет ли амплитуда колебаний x_0 или $\frac{1}{2}x_0$, период будет тот же самый. Это свойство гармонических колебаний называется *изохронностью*, т. е. *равновременностью колебаний*. Свойством изохронности обладают малые колебания математического маятника. Математический маятник можно осуществить на практике в виде достаточно тяжелого шарика, подвешенного на гибкой нерастяжимой нити. Масса нити должна быть малой по сравнению с массой шарика.

Рассмотрим случай малых колебаний математического маятника, когда угол φ_{max} мал (рис. 9).

Если рассмотреть какое-то промежуточное положение маятника, то с высокой степенью точности равнодействующая силы тяжести $\vec{mg_0}$ и натяжения нити $\vec{N}$, равная $\vec{R}$, будет по величине равна

$$R=mg_0\sin\varphi\cong mg_0\varphi.$$

Из второго закона Ньютона мы получим:

$$ma=-mg_0\varphi, \qquad (22)$$

или

$$a=-g_0\varphi.$$

Умножая правую и левую части (22) на длину маятника l и замечая, что для малых φ, $l\varphi=S\cong x$, получим:

$$a+\frac{g_0}{l}\cdot x=0. \qquad (23)$$

Уравнение (23) совпадает с (18), если $\frac{g_0}{l}=n^2$. Следовательно, период малых колебаний математического маятника определится по формуле

$$T=\frac{2\pi}{n}=2\pi\sqrt{\frac{l}{g_0}}, \qquad (24)$$

где l — длина маятника.

Таким образом, малые колебания математического маятника обладают свойством изохронности, и такой маятник можно применять для измерения промежутков времени. Это свойство малых колебаний открыл Г. Галилей.

Вот как рассказывает об этом академик А. Н. Крылов в книге «Вибрация судов»: «Триста пятьдесят лет тому назад Галилей в Флорентийском кафедральном соборе, видимо, с гораздо большим вниманием следил за качаниями паникадила, нежели слушал мессу и проповедь архиерея. Паникадило, висевшее из высокого купола собора, совершало размахи медленно, примерно в 7 секунд, справа налево, так что Галилею было легко вести двойной счет числа размахов и биений своего пульса. Месса была длинная; размахи паникадила становились все меньше и меньше, а между тем продолжительность каждого размаха оставалась неизменной. Так по преданию Галилей открыл свойство изохронности малых колебаний маятника».

Если период колебаний маятника известен, то из уравнения (24) мы можем определить ускорение свободного падения в данной области пространства:

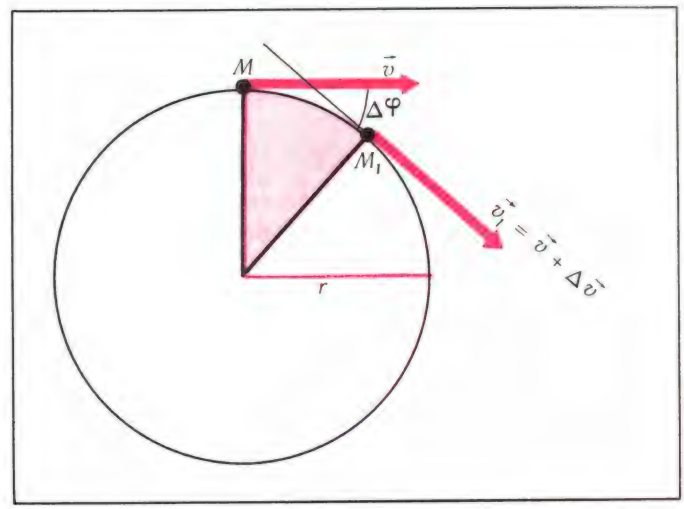
$$g_0=\frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

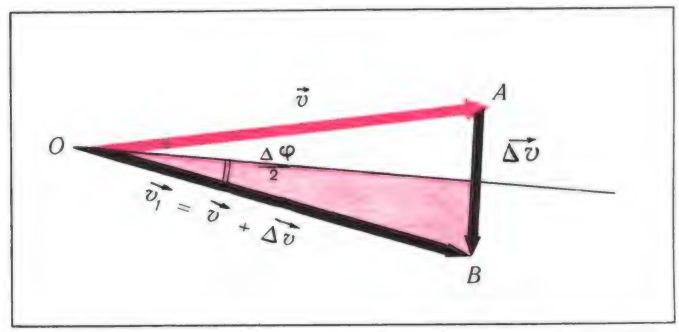
Движение по окружности

Скорость материальной точки есть *векторная величина*. Приращение скорости $\vec{\Delta v}$ за малый промежуток времени Δt в общем случае криволинейного неравномерного движения обусловлено изменением вектора скорости и по величине и по направлению. Рассмотрим равномерное движение материальной точки массой m по окружности радиуса r. В этом случае приращение $\vec{\Delta v}$ вектора обусловлено изменением только его направления. Возьмем два близких по времени (t и $t+\Delta t$) положения движущейся точки (M и M_1), тогда очевидно, что вектор $\vec{v_1}=\vec{v}+\vec{\Delta v}$

Рис. 10.

Рис. 11.





(рис. 10 и 11). Из равнобедренного треугольника OAB получим:

$$AB = |\Delta\vec{v}| = 2 \cdot OA \cdot \sin\frac{\Delta\varphi}{2} = 2v\sin\frac{\Delta\varphi}{2}.$$

Если угол $\Delta\varphi$ мал, то $\sin\frac{\Delta\varphi}{2} \approx \frac{\Delta\varphi}{2}$ и, следовательно,

$$|\Delta\vec{v}| = v\Delta\varphi.$$

Ускорение точки M направлено к центру круга и по величине равно:

$$\frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t} = a_c = v\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{v}{r} \cdot \frac{r\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{v}{r} \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}. \quad (25)$$

Формулу (25) можно записать в иной форме, если ввести понятие угловой скорости. Мы будем называть угловой скоростью радиуса, следящего за движущейся точкой, отношение приращения угла поворота радиуса $\Delta\varphi$ к приращению времени Δt, т. е.

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (26)$$

где ω — угловая скорость радиуса, следящего за точкой M, движущейся по окружности. Если правую и левую части уравнения (26) умножить на r, то

$$r\omega = \frac{r\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\Delta S}{\Delta t} = v,$$

и, следовательно, центростремительное ускорение (25) можно записать в виде:

$$a_c = v\omega = \omega^2 r.$$

Угловая скорость ω характеризует быстроту вращения радиуса, следящего за движущейся точкой M. В паспорте различных двигателей обычно указывают число оборотов в минуту. Легко выразить угловую скорость ω через число оборотов n_1 в минуту. В самом деле, за один оборот радиус, следящий за движущейся точкой, поворачивается на угол 2π; за n_1 оборотов в минуту он повернется на угол $2\pi n_1$, и, следовательно,

$$\omega = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{\pi n_1}{30} \cong 0{,}1 n_1. \quad (27)$$

Движение в поле тяготения

Исследования поля тяготения Земли показали, что в ряде случаев можно считать силу притяжения, обусловленную массой Земли, центральной (направленной к центру Земли) и подчиняющейся закону тяготения Ньютона, т. е.

$$F = \mu\frac{mM}{r^2}, \quad (28)$$

где m — масса притягиваемой материальной точки (или сравнительно небольшого материального тела: самолета, ракеты, космического корабля и т. п.), M — масса Земли, μ — постоянная тяготения ($\mu = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н $\cdot$ м^2/кг^2), r — расстояние точки от центра Земли (рис. 12).

Если считать плотность Земли функцией только расстояния от центра, то можно совершенно строго доказать, что в этом случае Земля притягивает внешнюю материальную точку, как точка, расположенная в центре Земли и имеющая массу, равную массе Земли.

Мы будем считать Землю (приближенно) сферой радиуса $r = R$, и на поверхности Земли силу притяжения можно записать на основании соотношения (28) как $F_0 = \mu\frac{mM}{R^2}$ и на основании второго закона Ньютона $F_0 =$ силе тяжести $= mg_0$, где g_0 — ускорение, сообщаемое массой Земли точке, расположенной на ее поверхности.

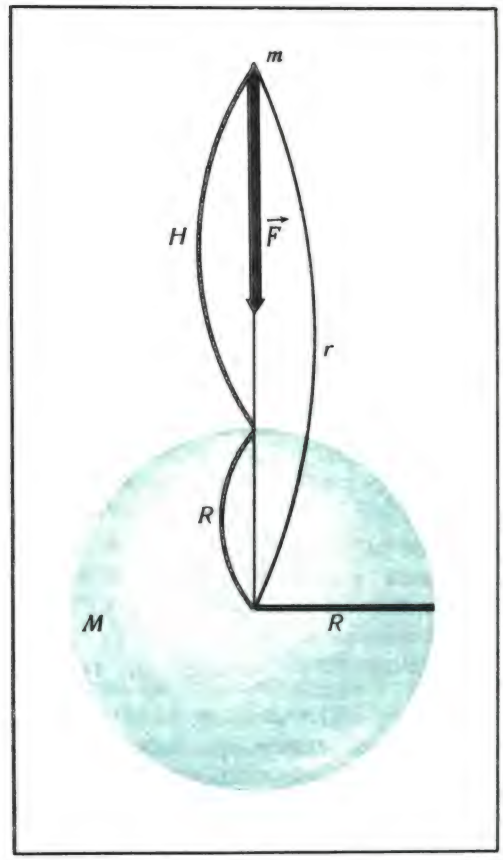
Таким образом,

$$\mu \cdot \frac{mM_2}{R^2} = mg_0,$$

и, следовательно, гравитационную силу, обусловленную притяжением частиц земного шара для точки массой m, можно записать в виде:

$$F = mg_0\frac{R^2}{r^2} = mg_н, \quad (29)$$

Рис. 12.



где $g_н$ — ускорение, обусловленное гравитационной силой Земли на высоте H над поверхностью Земли ($r = R + H \geqslant R$).

Рассмотрим движение искусственного спутника Земли по окружности радиуса R при $H \longrightarrow 0$, пренебрегая сопротивлением атмосферы. На основании формулы (25) центростремительное ускорение спутника будет $\frac{v_1^2}{R}$, где v_1 — первая космическая скорость. Но, с другой стороны, это ускорение совпадает с гравитационным ускорением g_0, обусловленным массой Земли. Таким образом,

$$\frac{v_1^2}{R} = g_0,$$

откуда первая космическая скорость

$$v_1 = \sqrt{g_0 R} \cong 7912 \text{ м/с}. \qquad (30)$$

Зная v_1 и длину окружности радиуса R (длину экватора, например), можно найти время полного оборота спутника вокруг Земли. Это время будет равно 84 мин 26 с. Можно по формулам (25) и (29) найти скорость искусственного спутника Земли на любой высоте H. В самом деле, приравнивая центростремительное ускорение $\frac{(v_1^2)_н}{R+H}$ к гравитационному на высоте H, получим:

$$g_н = g_0 \frac{R^2}{r^2} = g_0 \frac{R^2}{(R+H)^2} = \frac{(v_1^2)_н}{R+H}.$$

Таким образом,

$$(v_1)_н = \frac{\sqrt{g_0 R} \cdot \sqrt{R}}{\sqrt{R+H}} = 7912 \sqrt{\frac{R}{R+H}}, \qquad (31)$$

где $(v_1)_н$ — скорость спутника на высоте H.

Первая космическая скорость убывает по закону (31) с увеличением высоты над поверхностью Земли (см. таблицу).

Формула для периода обращения спутника $T_н$ будет:

$$T_н = \frac{2\pi (R+H)}{(v_1)_н} = 84 \text{ мин } 26 \text{ с} \left(\frac{R+H}{R}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (32)$$

Исходя из формулы (32) можно найти высоту полета H такого искусственного спутника Земли, у которого время обращения будет равно 24 ч. (Такой спутник будет на экваторе «висеть» над вполне определенным меридианом и не двигаться относительно поверхности Земли. Мы называем теперь такие спутники *геостационарными*.) Простые вычисления дают $H = 35\,810$ км.

Решим теперь задачу о максимальной высоте подъема материальной точки, брошенной вертикально вверх с начальной скоростью v_0. Гравитационное поле будем вначале (малые высоты подъема) считать однородным. В этом случае движение будет равнозамедленным и определяться по формуле

$$H = v_0 t - \frac{1}{2} g_0 t^2. \qquad (33)$$

Когда точка достигает высоты $H = H_{max}$, то ее скорость будет равна нулю. Таким образом, имеем соотношение

Таблица

Высота спутника над поверхностью Земли — H (в км)	Скорость спутника $(v_1)_н$ (в м/с)	Период обращения спутника		
		ч	мин	с
0	7912	1	24	26
200	7791	1	28	26
400	7675	1	32	30
1000	7356	1	45	02
3000	6525	2	30	31
6000	5679	3	48	18

В таблице даны значения скоростей искусственных спутников Земли, обращающихся на разных высотах по круговым орбитам, и периоды их обращения. Первая строка этой таблицы имеет чисто теоретическое значение, так как при скорости полета $v = v_1$ пренебрегать у поверхности Земли силой сопротивления воздуха нельзя.

$$v = v_0 - g_0 t = 0,$$

откуда

$$t = \frac{v_0}{g_0}. \qquad (34)$$

Формула (34) дает время полета до максимальной высоты H_{max}. Подставляя уравнение (34) в уравнение (33), получим максимальную высоту подъема:

$$H_{max} = \frac{v_0^2}{2g_0}. \qquad (35)$$

Эта формула впервые была получена Г. Галилеем.

Можно решить задачу о максимальной высоте подъема и в ньютоновом поле тяготения Земли, когда гравитационная сила определяется формулой (29). Это решение требует знания высшей математики. Окончательная формула для переменного поля тяготения имеет вид:

$$H_{max} = \frac{v_0^2/g_0}{2 - \frac{v_0^2}{g_0 R}} = \frac{v_0^2/g}{2 - \frac{v_0^2}{v_1^2}}. \qquad (36)$$

Когда скорость v_0 мала по сравнению с первой космической $\frac{v_0^2}{v_1^2} \to 0$, тогда из формулы (36) получается формула Галилея. Из формулы (36) можно получить величину второй космической скорости. Чтобы ракета покинула поле тяготения Земли, нужно неограниченно увеличивать H_{max}; это будет возможно, если знаменатель дроби устремить к нулю:

$$2 - \frac{v_0^2}{g_0 R} = 0,$$

откуда

$$v_0 = v_2 = \sqrt{2 g_0 R}. \qquad (37)$$

Сравнивая v_1 (формула 30) с v_2, находим, что

$$v_2 = \sqrt{2}\, v_1 \cong 11\,189 \text{ м/с}.$$

Механика тел переменной массы

Механика тел переменной массы — новая широкая область исследований в современной теоретической механике, изучающая движение и равновесие тел, масса которых изменяется во время движения. Зарождение идей об изучении движения тел переменной массы относится к концу XIX в., когда развитие ракетной техники, наблюдательной астрономии и электродинамики привело к рассмотрению нового класса задач механики, когда масса движущегося тела является или функцией времени (ракетная техника, небесная механика), или функцией скорости (специальная теория относительности). Имея в виду необычайно быстрое развитие в XX в. новых отраслей промышленности (ракетостроения и ядерной энергетики), для которых теория реактивного движения и теория относительности имеют фундаментальное значение, можно утверждать, что прогресс теоретической механики в XX столетии обусловлен в значительной степени совершенствованием методов механики тел переменной массы.

Классическая механика имеет в своей основе законы движения материальной точки, строго сформулированные Ньютоном. Почти все расчетные формулы, рекомендуемые в классической механике для характеристики движений различных объектов, имеют в качестве исходного положения второй закон Ньютона, устанавливающий простое соотношение между ускорением материальной точки, ее массой и действующими силами.

Однако второй закон Ньютона справедлив, вообще говоря, только для движений материальной точки постоянной массы. Если во время движения масса точки изменяется, то основной закон движения следует формулировать в новой, более общей форме, учитывая характеристики процесса изменения массы точки при определении ее ускорения.

В различных отраслях промышленности можно указать примеры движущихся тел, масса которых заметно изменяется во время движения. Так, масса вращающегося веретена, на которое навивается нить, увеличивается в процессе движения. Рулон газетной бумаги, который разматывается на валу печатной машины, дает нам пример тела, масса которого уменьшается с течением времени. Управляемые ракеты различных конструкций, реактивные снаряды, реактивные мины и торпеды — тела, масса которых существенно изменяется во время движения.

Случаи движения тел, масса которых изменяется с течением времени, можно видеть во многих явлениях природы. Так, например, масса Земли возрастает вследствие падения на нее метеоритов и метеорной пыли. Масса падающего метеорита, движущегося в атмосфере, убывает, так как частицы метеорита отрываются благодаря воздействию воздуха или сгорают. Масса Солнца возрастает от присоединения космической пыли и уменьшается от излучения.

Основной закон динамики точки переменной массы был открыт русским ученым профессором Петербургского политехнического института И. В. Мещерским в 1897 г. Для развития теоретической механики и особенно ее приложений в задачах динамики ракет установление исходного уравнения имеет весьма большое, принципиальное значение.

Ракета на старте ...и в полете.

Если ограничиться рассмотрением движения точки переменной массы, то можно указать *два* основных фактора, влияющих на структуру уравнений движения этой точки и отличающих ее уравнения движения от уравнения Ньютона,— это *переменность массы точки и принятая гипотеза отделения частиц, определяющая добавочную, или реактивную, силу*. Если относительная скорость отделяющихся частиц равна нулю, то добавочная сила, обусловленная процессом отделения частиц, также равна нулю. Естественно поэтому было начать разработку теории с такого частного случая, когда реактивная сила не входит в расчеты. Результаты исследования движения точки переменной массы при этом простом предположении были доложены Мещерским Петербургскому математическому обществу еще в 1893 г.

Последующие работы по вопросам теории движения тел переменной массы привели Мещерского к созданию строго обоснованной динамики точки переменной массы.

Полученное Мещерским основное уравнение движения точки переменной массы дало возможность установить количественные закономерности для различных частных задач. Следует только подчеркнуть, что одной из существенных гипотез, лежащих в основе метода Мещерского, является *гипотеза близкодействия* (контактного взаимодействия тела и отбрасываемых частиц). Допускается, что в момент отделения частицы тела или точки происходит явление, аналогичное удару: частица за очень малый промежуток времени получает конечную относительную скорость и дальнейшее взаимодействие частицы и основного тела прекращается. Второй закон Ньютона получается из уравнения Мещерского как частный случай

В 1904 г. Мещерский опубликовал большую работу, посвященную изучению движения точки переменной массы с одновременным присоединением и отделением частиц. В этой работе по существу содержится теория поступательного движения реактивных аппаратов с воздушно-реактивными двигателями, хотя рассмотренные Мещерским частные задачи относились к динамике нити и движению реактивного судна.

Ценный вклад в механику тел переменной массы внес выдающийся русский ученый К. Э. Циолковский. В 1903 г. он опубликовал работу «Исследование мировых пространств реактивными приборами», в которой весьма обстоятельно исследован ряд интересных случаев прямолинейных движений тел переменной массы (ракет). Простейшая задача, решенная и исследованная Циолковским, касается возможностей самого принципа реактивного движения.

Иван Всеволодович Мещерский (1859—1935).

Изучая движение точки в среде без внешних сил, Циолковский показал, что при достаточно больших скорости отбрасывания частиц и отношении начальной массы точки к массе конечной можно получить весьма большие (космические) скорости. Выведенная им формула, устанавливающая связь между скоростью ракеты и ее массой, получила мировую известность и широко используется для предварительных расчетов в практике работ конструкторских бюро. Циолковский первый в научной литературе дал оценку эффективности процессов отбрасывания частиц и определил коэффициент полезного действия ракет, указав на выгодность реактивных двигателей при больших скоростях движения. В своих последующих работах (1911—1914) он подробно изучил вопрос о запасах массы, необходимых для преодоления ракетой поля тяготения Земли, и предложил высококалорийные топлива, обеспечивающие большие скорости отбрасывания (истечения) частиц. Циолковский выдвинул много новых идей в области конструирования реактивных аппаратов для межпланетных сообщений, и его по праву считают изобретателем жидкостных реактивных двигателей, ракет дальнего действия и основоположником теории межпланетных сообщений.

В механике тел переменной массы Циолковскому принадлежит идея изучения таких движений точки переменной массы, когда в некоторых интервалах времени масса точки изменяется непрерывно, а в некоторые моменты — скачком (так называемые многоступенчатые ракеты, или поезда ракет). В задачах этого типа он первый открыл оптимальное соотношение масс ступеней поезда ракет при некоторых частных предположениях. Замечательные работы И. В. Мещерского и К. Э. Циолковского гармонично дополняют друг друга. Конкретные задачи ракетной техники, рассмотренные Циолковским, не только показали богатство практических приложений механики тел переменной массы, но и способствовали, благодаря постановке совершенно новых оригинальных проблем, развитию самой теории.

Механика тел переменной массы — наука XX в. В течение первых трех десятилетий XX в. этот раздел механики разрабатывался главным образом инженерами-ракетчиками. Было решено много интересных и важных задач о движении ракет. Опыт применения реактивного оружия во второй мировой войне явился тем реальным материалом, на основе которого строится более совершенная теория движения тел переменной массы, обеспечившая развитие ракетной техники и космонавтики. Связь теоретических изысканий в области механики тел переменной массы с актуальными задачами ракетной техники очевидна, так как масса некоторых современных одноступенчатых ракет уменьшается во время работы двигателя в 8—10 раз. В наши дни развитие этого нового раздела теоретической механики в значительной степени определяет дальнейший процесс методов классической механики.

Для механики тел переменной массы фундаментальное значение имеют два закона классической механики:

1. При любых механических процессах, протекающих в изолированной механической системе точек, без действия внешних сил, суммарное количество движения системы (вектор количества движения системы) остается постоянным.

2. Закон независимого действия сил, позволяющий складывать по правилу параллелограмма приращение скорости точки переменной массы, обусловленное внешними силами, с приращением скорости, обусловленным действием реактивной силы, возникающей от истечения частиц из сопла реактивного двигателя.

Мещерский впервые получил основное уравнение динамики точки переменной массы для прямолинейного движения в следующем виде:

$$ma = F + \Phi, \qquad (38)$$

где $m = m(t)$ — переменная (с течением времени) масса точки, F — равнодействующая всех внешних сил и Φ — реактивная сила. Реактивная сила пропорциональна секундному расходу истекающих из сопла двигателя частиц и их относительной (по отношению к корпусу ракеты) скорости.

Рассмотрим простейшую задачу прямолинейного движения точки переменной массы, когда $F = 0$. Эту задачу называют первой задачей Циолковского. В этом случае решение уравнения (38) приводит нас

Константин Эдуардович Циолковский (1857—1935).

к формуле Циолковского, или основному закону движения ракет. Формулу Циолковского можно записать в виде:

$$v_{max} = V_r \ln \frac{M_0}{M_e}, \qquad (39)$$

где v_{max} — максимальная скорость ракеты, V_r — относительная скорость истечения частиц из сопла реактивного двигателя (скорость на срезе сопла), M_0 — начальная (стартовая) масса ракеты, M_e — масса ракеты, когда все топливо израсходовано (масса ракеты без топлива). Ясно, что $M_0 = M_e + m_1$, где m_1 — масса топлива. Поэтому уравнение (39) можно записать в виде:

$$v_{max} = V_r \ln \frac{M_e + m_1}{M_e} = V_r \ln (1 + Z), \qquad (40)$$

где $Z = \frac{m_1}{M_e}$ — отношение массы топлива к массе ракеты без топлива, называемое *числом Циолковского*. В реальных конструкциях ракет число Циолковского редко превосходит значение $Z = 9$. Пространство, в котором $\vec{F} = 0$, называют *свободным пространством*. Формула выявляет максимальные возможности реактивного движения. Например, при $V_r = 3000$ м/с, $Z = 1{,}0$, $v_{max} = 2079$ м/с.

Из формулы Циолковского можно сделать следующие выводы:

1. Скорость точки переменной массы в конце процесса отбрасывания частиц (в конце работы двигателя) тем больше, чем больше относительная скорость отбрасывания (истечения) частиц. Если относительная скорость отбрасывания удваивается, то и скорость точки возрастает в два раза.

2. Максимальная скорость точки переменной массы возрастает при увеличении отношения начальной массы точки к ее массе в конце процесса отбрасывания частиц.

Логарифмический закон (39) был сформулирован Циолковским в 1914 г. в виде следующей теоремы: «Когда масса ракеты плюс масса взрывчатых веществ, имеющихся в реактивном приборе, возрастает в геометрической прогрессии, скорость ракеты увеличивается в прогрессии арифметической». В самом деле, если отношение $\frac{M_0}{M_e}$ будет, например, последовательно принимать значения 2, $4 = 2^2$, $8 = 2^3$, $16 = 2^4$,..., то соответственно

$$(v_1)_{max} = V_r \ln 2; \quad (v_2)_{max} = 2V_r \ln 2 = 2(v_1)_{max};$$
$$(v_3)_{max} = 3V_r \ln 2 = 3(v_1)_{max} \ldots$$

Из формулы Циолковского следует весьма важный практический вывод: для получения возможно больших максимальных скоростей ракеты (точки переменной массы) гораздо выгоднее увеличивать относительные скорости отбрасывания частиц, чем увеличивать относительный запас топлива.

Пользуясь формулой Циолковского, можно определить основные характеристики многоступенчатых ракет. Очень простой и наглядный результат получается в случае, когда приращения скорости от срабатывания последовательных ступеней одинаковы. Счет ступеней будем вести сверху вниз. Пусть $M'_{ст}$ есть стартовая масса первой ступени, а M_1 есть суммарная масса полезного груза и конструкции ракеты (без топлива), тогда, обозначая

$$\lambda = \frac{M'_{ст}}{M_1},$$

получим по формуле (39) скорость первой ступени:

$$v_1 = V_r \ln \lambda. \qquad (41)$$

Рассмотрим теперь двухступенчатую ракету. Первая ступень для нее будет полезным грузом, а отношение $\frac{M''_{ст}}{M_2}$ равным λ. Тогда скорость, сообщаемая первой ступени (от второй), будет снова равна v_1. Но двухступенчатая ракета сообщит полезному грузу первой ступени скорость $v_2 = 2v_1$, или

$$v_2 = 2V_r \ln \lambda = V_r \ln \lambda^2. \qquad (42)$$

Рассуждая аналогичным образом, найдем, что трехступенчатая ракета сообщит полезному грузу первой ступени скорость $v_3 = 3V_r \ln \lambda = V_r \ln \lambda^3$, а

Рис. 13.

n-ступенчатая — скорость $v_n = V_г \ln \lambda^n$. Мы видим, что если массы последовательных ракет растут в геометрической прогрессии, то скорости полезного груза первой ступени увеличиваются в прогрессии арифметической. Найдем стартовую (начальную) массу двухступенчатой ракеты при $\lambda = e^2 \cong 7{,}4$ (число Циолковского $Z = 6{,}4$; e — основание натуральных логарифмов), если масса полезного груза первой ступени и ее конструкции равна $M_1 = 10$ т. Из приведенных формул следует, что первая и вторая ступени будут иметь массу:

$$M'_{ст} = \lambda M_1 = e^2 M_1 \cong 7{,}4 \cdot 10 = 74 \text{ т},$$

$$M''_{ст} = \lambda^2 M_1 = e^4 M_1 \cong 54{,}6 \cdot 10 = 546 \text{ т}.$$

Если скорость истечения газов из сопла двигателя будет 3000 м/с, то полезный груз получит в свободном пространстве $(\vec{F} = 0)$ скорость, равную 12 км/с, т. е. немного большую второй космической.

Специальная теория относительности

Принципиальное значение для развития механики больших скоростей, сравнимых со скоростью 300 000 км/с, имеют исследования Альберта Эйнштейна. В своей работе «К электродинамике движущихся тел», опубликованной в 1905 г., Эйнштейн сформулировал более точную теорию механики быстродвижущихся тел — специальную теорию относительности.

В классической механике (или, как часто говорят, в дорелятивистской физике) считалось, что если мы знаем декартовы координаты x, y и время t события в некоторой неподвижной (приближенно) системе координат, то можем легко вычислить координаты x_1, y_1 и время t_1 в инерциальной системе (x_1, y_1), движущейся относительно неподвижной системы поступательно (т. е. без вращения относительно центра масс), прямолинейно и равномерно. В самом деле, если начало системы (x_1, y_1) в момент $t = 0$ имело координаты $x_0 = 0$, $y_0 = 0$ и система (x_1, y_1) движется вдоль оси Ox со скоростью v_0, то в момент t координаты точки x_1, y_1 будут относительно системы (x, y) следующими:

$$x = x_1 + v_0 t,$$
$$y = y_1.$$

При этом чисто интуитивно предполагалось: время t в системе (x, y) течет так же, как и в системе (x_1, y_1), т. е. $t = t_1$; таким образом, допускалось, что течение времени не зависит от состояния движения тела. Длина масштабной линейки абсолютна, и если в покоящейся системе (x, y) некоторый отрезок имеет длину l, то он будет иметь ту же длину и в движущейся системе (x_1, y_1), иначе говоря $l = l_1$. В классической механике течение времени и пространственные интервалы считались независимыми друг от друга и не зависели от состояния движения системы (тела) отсчета.

В конце XIX в. накопилось достаточно большое число фактов (главным образом экспериментальных), относящихся к движению частиц со скоростями, сравнимыми со скоростью света, которые не могли быть объяснены исходя из законов классической механики.

Оказалось, что при скоростях порядка скорости света пространственные соотношения (длины отрез-

Галилео Галилей (1564—1642).

ков) и течение времени зависят от скорости движения системы (x_1, y_1).

Исходными для построения теории относительности являются два закона природы, получившие подтверждение в самых различных явлениях движения. Эти законы были сформулированы Эйнштейном в следующем виде:

1. «Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, находящихся относительно друг друга в равномерном поступательном движении, эти изменения состояния относятся».

2. «Каждый луч света движется в «покоящейся» системе координат с определенной скоростью, независимо от того, испускается этот луч света покоящимся или движущимся телом».

Первый закон распространяет закон эквивалентности инерциальных систем (закон относительности классической механики Галилея — Ньютона) на широкий класс физических явлений. Второй закон устанавливает постоянство скорости света независимо от скорости движения источника света.

Второй закон кажется наиболее парадоксальным. В самом деле, при изучении движения тел со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света, мы убеждаемся и теоретически, и экспериментально, что скорость тела относительно неподвижной системы координат зависит от движения «платформы», с которой бросание тела производится. Так мяч, брошенный в направлении движения поезда, будет иметь по отношению к Земле бóльшую скорость, нежели мяч, брошенный с неподвижного поезда. Для случая прямолинейного движения результирующая скорость будет равна алгебраической сумме слагаемых скоростей. При движении платформы и тела в одну сторону результирующая скорость будет равна арифметической сумме скоростей и будет подсчитываться по формуле:

$$v_{\text{рез}} = v_1 + v_2, \tag{43}$$

где $v_{\text{рез}}$ есть результирующая скорость тела по отношению к Земле, v_1 — скорость платформы, v_2 — скорость тела по отношению к платформе. Например, при стрельбе с летящего самолета к скорости пули по отношению к корпусу самолета нужно прибавить скорость самолета, и тогда получится скорость пули по отношению к Земле (рис. 13).

Закон сложения скоростей в теории Эйнштейна записывается иначе:

$$v_{\text{рез}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}, \tag{44}$$

где c — скорость света.

Из уравнения (44) следует, что результирующая скорость всегда меньше скорости света. Даже в предельном случае, когда $v_1 = c$ и $v_2 = c$, мы из уравнения (44) получим, что

$$v_{\text{рез}} = \frac{c + c}{1 + 1} = c. \tag{45}$$

Существенные изменения претерпевают и другие основные понятия механики. Масса тела в задачах специальной теории относительности зависит от скорости движения тела:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{46}$$

В формуле (46) m_0 — масса тела при $v = 0$ (масса «покоя»), m — масса тела, движущегося со скоростью v, и $\beta = \frac{v}{c}$.

Как видно из формулы (46), масса тела неограниченно возрастает, если его скорость приближается к скорости света.

Время в теории относительности не является универсальным; для движущегося наблюдателя время течет медленнее, чем для неподвижного. Связь времен, показываемых покоящимися и движущимися часами, определяется формулой:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \tag{47}$$

где t_0 — время, отсчитываемое неподвижными часами (время в неподвижной системе координат), а t — время, показываемое часами, движущимися со скоростью v относительно неподвижной системы. Для обычных задач механики величина β^2 очень мала по сравнению с единицей, и механика Ньютона дает весьма точные результаты. Так, например, если взять движение со скоростью $v = 30$ км/с (это примерно скорость движения Земли вокруг Солнца), то $\beta^2 = \left(\frac{30}{300\,000}\right)^2 = 10^{-8}$, что трудно обнаружить даже весьма точными приборами. Заметим, что при скоростях, близких к скорости света, уточнения, даваемые теорией относительности, приобретают принципиальный характер и в настоящее время, например, конструирование ускорителей, определение времени жизни элементарных частиц и экспериментальное определение массы быстродвижущихся тел не могут быть произведены без учета результатов, вытекающих из специальной теории относительности.

Значение механики для современной техники

Классическая механика есть научная основа важнейших разделов современной техники.

На основе законов механики производятся определения орбит (траекторий) искусственных спутников Земли столь точно, что координаты спутника на небесной сфере на несколько суток, недель, месяцев и даже лет в зависимости от высоты орбиты заранее сообщаются наблюдательным пунктам всего земного шара, и эти предсказания выполняются безукоризненно.

При помощи расчетов, основанных на законах механики и аэродинамики, в конструкторских бюро авиационных заводов устанавливаются геометрические формы новых самолетов и определяются их летные характеристики (скорость полета на разных высотах, дальность и продолжительность полета при заданных запасах топлива, практические предельные высоты полета, устойчивость, возможность маневрирования и др.) с большой точностью.

Законы механики позволяют предварительно вычислять траекторию, скорость и дальность полета артиллерийских снарядов, баллистических ракет дальнего действия, беспилотных самолетов. Всюду, где инженеру приходится иметь дело с механическим движением, механика дает надежную, проверенную практикой основу для правильного познания количественных закономерностей различных конкретных движений.

При проектировании и строительстве новых сооружений (мостов, плотин, самолетов, ракет, космических кораблей, зданий) на основании колоссального предшествующего опыта специалисты настолько уверены в справедливости законов механики, что не сомневаются в вытекающих из расчетов выводах. Если в ряде случаев и получаются расхождения теории с практикой, то всегда при последующем строгом и тщательном анализе они объясняются или неточностью исходных данных, или ошибками вычислений.

По традиции главный инженер-строитель и руководитель проекта железнодорожного моста встают под мост, когда первый поезд проходит по нему во время государственных испытаний. Создатели моста полностью уверены в осуществленной конструкции, спроектированной по законам механики.

Законы механики — подлинное руководство к безошибочному действию в современной технической практике.

В наши дни механика направляет творческую интуицию ученых и инженеров, давая им в краткой и предельно ясной форме итог колоссального опыта человечества.

Исаак Ньютон (1643—1727)

Гениальный английский физик, механик, астроном и математик. Член, а затем президент Лондонского королевского общества, иностранный член Парижской академии наук. Ньютон сформулировал основные законы классической механики, открыл закон всемирного тяготения, законы разложения белого света на монохроматические лучи и разработал (одновременно с Г. Лейбницем) дифференциальное и интегральное исчисления. Главный труд Ньютона «Математические начала натуральной философии» (1687) являлся отправным пунктом всех работ по механике и небесной механике в течение последующих двух веков. Широко известна также работа «Оптика» (1704), в которой Ньютон объясняет большинство световых явлений с помощью развитой им корпускулярной теории света. Высокое признание получил научный подвиг Ньютона, выразившийся в создании новых научных основ мироздания взамен фантастических домыслов религии.

Волчок

В этом томе есть статьи простые и сложные. Статья «Волчок», пожалуй, самая сложная. Мы даже сомневались, помещать ли ее. Но что поделаешь — в науке вообще много сложного. Ведь в будущем многим из вас придется читать очень трудные книги. Пусть же тем, кто мечтает стать ученым, инженером, конструктором, эта статья напомнит, что путь в науку нелегок, он требует упорства, терпения, самоотверженности.

Вращающийся волчок — увлекательная детская игрушка. Кто из ребят не задумывался над удивительными свойствами волчка? Но, по-видимому, не все знают, что волчок — важнейший элемент целого ряда сложных приборов. Сейчас трудно найти область техники, где в той или иной мере не использовался бы волчок. Так, при помощи волчков осуществляется пилотирование самолетов, бурение скважин, прокладка штолен метрополитена, вождение кораблей (в том числе и подводных), управление космическими объектами и многое, многое другое. Об удивительных свойствах волчка, о том, как он используется в технике, и будет рассказано в этой статье.

Прецессия и нутация волчка

Понаблюдаем вначале за поведением волчка, опирающегося острием своей оси симметрии на коническое углубление неподвижной опоры (рис. 1). Если попытаться поставить его в вертикальное положение, то он немедленно опрокинется, как только мы перестанем его поддерживать. Это естественно, ибо известно из опыта, что невозможно сохранить равновесие, имея единственную точку опоры. Нельзя, например, поставить в комнате стул на одну ножку так, чтобы он стоял на ней продолжительное время. Однако если волчку сообщить большую скорость вращения, или, как говорят специалисты, большую *угловую скорость* Ω, то все резко изменится. Волчок, как бы нарушая законы природы, будет стоять вертикально и не упадет. Мало того, он не упадет и в том случае, если поставить его на острие с наклоном. Однако при этом ось волчка, предоставленного самому себе, начинает описывать вокруг вертикали коническую поверхность (рис. 2). Такое движение волчка называется *прецессией*, а время одного обращения волчка вокруг вертика-

Рис. 1. Быстро вращающийся волчок не падает. Из-за трения угловая скорость собственного вращения уменьшается. Когда скорость вращения становится недостаточно большой, ось волчка спиралеобразно удаляется от вертикали, и волчок падает.

Рис. 2. Медленная регулярная прецессия волчка происходит в ту же сторону, в которую вращается волчок (если смотреть сверху). Время обращения оси волчка вокруг вертикали (период прецессии) не зависит от угла Θ.

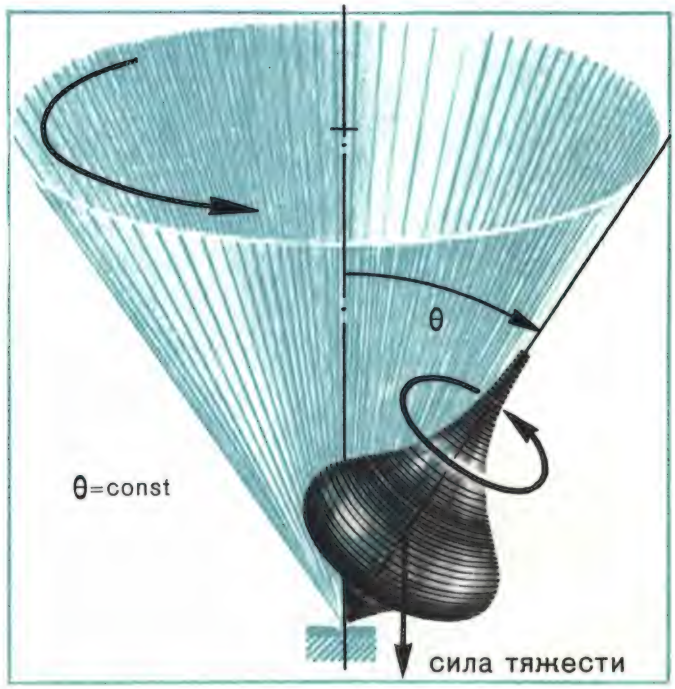


Рис. 3. Наклонно поставленный на острие волчок, предоставленный самому себе, без сообщения ему толчка. Вначале волчок падает так, как если бы он не имел вращения, но затем движение его апекса (точки пересечения оси волчка со сферой, центр которой совпадает с точкой опоры волчка) искривляется, и волчок вновь поднимается на исходную высоту. Затем опять падает и т. д.

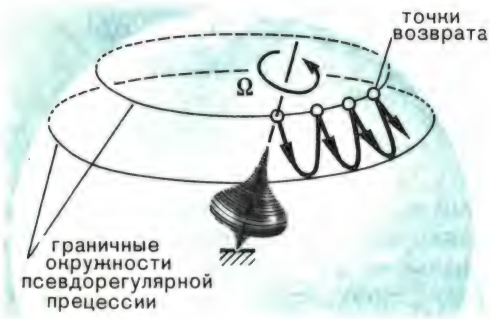


Рис. 4. Траектория апекса волчка, которому в начальное мгновение сообщен толчок V_0 в горизонтальном направлении в сторону, обратную общему ходу прецессии.

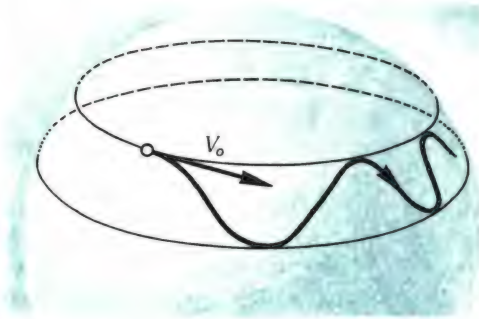
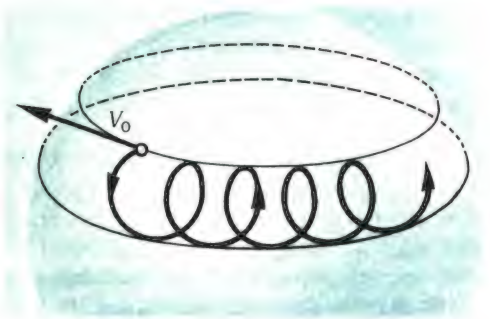


Рис. 5. Волчку был дан толчок V_0 в сторону общего хода прецессии. Апекс описывает волнистую траекторию. Если толчок будет сильнее, апекс станет описывать на сфере горизонтальную окружность.

Рис. 6. Из-за трения в опоре и воздействия на волчок окружающего воздуха нутации затухают, псевдорегулярная прецессия переходит в регулярную.



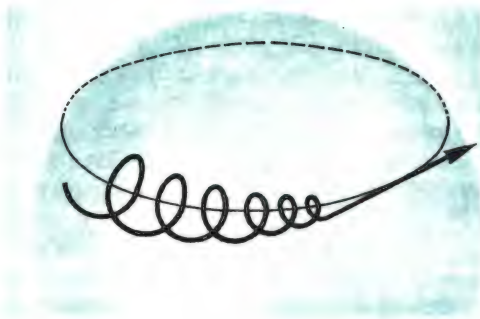
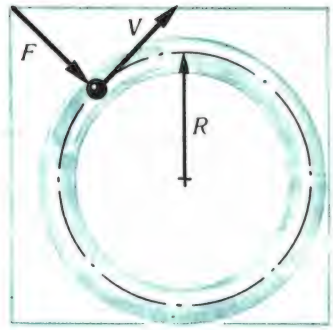


Рис. 7. Движение невесомой материальной точки в круговом абсолютно гладком неподвижном канале. Центростремительная сила F — это воздействие канала на точку. Если эту силу создать другим путем, то точка продолжала бы двигаться с постоянной скоростью V по окружности радиуса R и при отсутствии канала.



ли — периодом прецессии. Период прецессии тем больше, чем быстрее запущен волчок. Вместе с тем период прецессии при одной и той же скорости вращения волчка не зависит от угла отклонения его оси от вертикали. При очень большой угловой скорости вращения волчка конус, который описывает его ось, на первый взгляд кажется круговым. Однако при внимательном рассмотрении прецессии волчка обнаруживается, что движение его оси симметрии совсем не такое простое. На сфере с центром в точке опоры волчка *апекс*, т. е. точка пересечения оси со сферой, описывает сложную кривую, вид которой существенно зависит от того, какое движение было у оси волчка в начальное мгновение времени. Если внезапно отпустить ось, бывшую до того в неподвижности, то апекс вначале идет с возрастающей скоростью по сфере вниз (рис. 3). Далее, после того как апекс минует свое самое низкое положение, он вновь поднимается вверх, достигает начальной высоты, на мгновение замирает и вновь начинает падать, повторяя все сначала. Такие повторяющиеся движения называются *нутацией* волчка, а их продолжительность — *периодом нутации.* Продолжительность периода нутации, в отличие от периода прецессии, с увеличением скорости вращения уменьшается. Если же перед тем, как предоставить волчок самому себе, сообщить его наклонной оси симметрии некоторое движение, то траектория апекса будет в общем случае иной. Возможны траектории с петлеобразным движением (рис. 4) и волнистые траектории (рис. 5). Каждая из них последовательно касается двух расположенных на сфере горизонтальных окружностей.

Начальную скорость апекса можно подобрать такой, чтобы движение его по сфере происходило по горизонтальной окружности. Это особенное движение называется *регулярной прецессией.* Прецессия, сопровождаемая нутацией, называется *псевдорегулярной.* Обычно нутации бывают мало заметны. Из-за воздействия окружающей среды и трения с течением времени они исчезают, и псевдорегулярная прецессия переходит в регулярную (рис. 6).

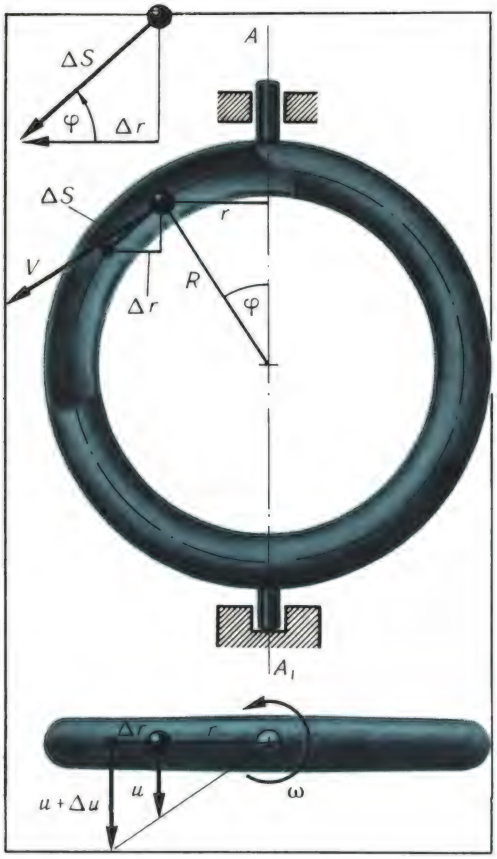


Рис. 8а. Материальная невесомая точка движется в абсолютно гладком канале, который сам вращается вокруг оси, лежащей в плоскости его круговой оси. Буквами V и u обозначены составляющие скорости точки. Поперечная составляющая u пропорциональна расстоянию r до оси вращения. Она изменяется при перемещении точки в канале за счет изменения величины r.

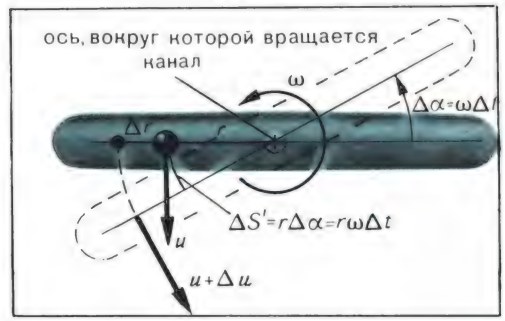


Рис. 8б. Вид на вращающийся канал со стороны оси его вращения; u — составляющая скорости материальной точки в направлении, перпендикулярном к плоскости канала.

Движение точки внутри кругового канала

Почему же не падает наклонно поставленный быстро вращающийся волчок, а совершает описанное выше сложное движение? Чтобы подготовиться к ответу на этот вопрос, рассмотрим вначале несколько вспомогательных примеров движения материальной точки. Пусть точка движется без трения внутри абсолютно гладкого замкнутого канала круговой формы (рис. 7). Предположим, что сила тяжести на нее не действует. Тогда единственной силой, действующей на точку, оказывается воздействие стенки канала. Вследствие абсолютной гладкости канала эта сила будет направлена перпендикулярно касательной к его круговой оси. Эту касательную следует, разумеется, проводить в том месте круговой оси, где материальная точка в данное мгновение находится. Сила воздействия стенки канала на материальную точку называется *реакцией связи*, так как канал связывает свободу движения точки. Если канал неподвижен, то реакция связи будет представлять собой центростремительную силу, имеющую направление к центру круговой оси канала. Она равна, как известно из курса физики, величине $F = m\frac{V^2}{R}$. В этой формуле V — скорость точки, m — ее масса и R — радиус круговой оси канала.

Центростремительная сила направлена все время перпендикулярно скорости точки, вследствие чего не может повлиять на размер последней. Эта сила изменяет лишь направление скорости материальной точки. В самом деле, направление скорости точки непрерывно совпадает с упомянутой выше касательной и, следовательно, все время поворачивается.

Начнем теперь равномерно вращать канал вокруг неподвижной оси AA_1, расположенной в его плоскости и проходящей через центр круговой оси канала (рис. 8а). В этом случае скорость находящейся в нем точки помимо составляющей V, идущей по касательной к круговой оси канала, будет иметь составляющую u, перпендикулярную к плоскости, содержащей эту ось. Определим силу, действующую на точку в таком сложном ее движении. Рассмотрим два последовательных положения канала: в начале и в конце малого интервала времени Δt. Канал повернется за это время на малый угол $\Delta\alpha$ (рис. 8б). Отношение $\frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$ называется *угловой скоростью канала*. Обозначим ее через ω. Таким образом, $\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$. За время Δt точка пройдет вдоль оси канала путь ΔS, причем, конечно, $\Delta S = V\Delta t$.

Пусть в некоторое мгновение материальная точка находится на расстоянии r от оси вращения канала. Очевидно (рис. 8а), что $r = R\sin\varphi$, где φ — угол между осью вращения канала и радиусом R, соединяющим материальную точку с его геометрическим центром.

Канал вращается вокруг оси AA_1 с угловой скоростью ω. Поэтому величина u составляющей скорости материальной точки в направлении, перпендикулярном к плоскости круговой оси канала, выра-

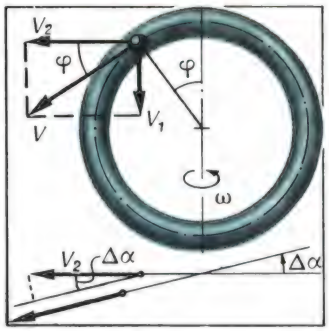


Рис. 9. Величину геометрического изменения составляющей скорости V_2 в направлении, перпендикулярном к плоскости круговой оси канала, с достаточной точностью можно приравнять к произведению $V_2\Delta\alpha$.

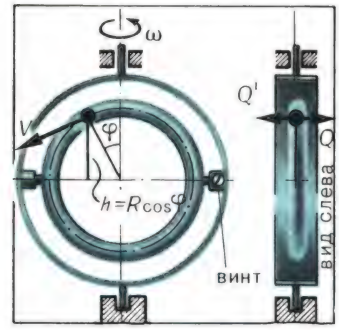


Рис. 10. Канал, подвешенный во вращающейся рамке. Посредством винта можно осуществлять или устранять вращение канала вокруг горизонтальной оси относительно рамки. Q — сила воздействия канала на материальную точку, Q' — противодействующая ей сила давления точки на стенку канала.

жается формулой $u = \omega r$. Заметим, однако, что за время Δt материальная точка успевает удалиться от оси вращения канала на расстояние Δr. Ее боковая скорость при этом изменяется на некоторую малую величину Δu (рис. 8а). Согласно формуле $u = \omega r$ имеем теперь $u + \Delta u = \omega(r + \Delta r)$. Учитывая здесь равенство $u = \omega r$, получаем после очевидного сокращения, что $\Delta u = \omega \Delta r$.

При рассмотрении рисунка 8а нетрудно заметить, что имеет место приближенное равенство $\Delta r = \Delta S \cos\varphi$, в котором ΔS по-прежнему перемещение материальной точки вдоль оси канала за время Δt. Только что полученное равенство выполняется тем точнее, чем меньше ΔS, а следовательно, и Δt. Поэтому, используя его в соотношении $\Delta u = \omega \Delta r$, получаем $\Delta u = \omega \Delta S \cos\varphi$.

Разделим теперь обе части последнего равенства на Δt и будем считать этот интервал времени исчезающе малым. В результате, учитывая, что $\frac{\Delta S}{\Delta t} = V$, придем к формуле $w_1 = \omega V \cos\varphi$, в которой введено обозначение $w_1 = \frac{\Delta u}{\Delta t}$. Величина w_1 представляет собой часть вектора полного ускорения материальной точки, обусловленную изменением составляющей u ее скорости в направлении, перпендикулярном к плоскости канала. Можно указать еще две части ускорения, одна из которых в точности равна w_1 и так же направлена. Происхождение этой второй части, которую обозначим через w_2, совершенно иное. Чтобы выяснить это обстоятельство, разложим, в свою очередь, составляющую скорости, направленную по касательной к каналу (т. е. вектор V), на две составляющие V_1 и V_2, направленные соответственно параллельно оси вращения канала и перпендикулярно этой оси (рис. 9). Составляющая V_2 определяется очевидной формулой $V_2 = V\cos\varphi$. Спустя время Δt эта составляющая скорости материальной точки повернется вместе с каналом на угол $\Delta\alpha$. Ее изменение в направлении, перпендикулярном к плоскости канала, мало отличается от произведения $V_2\Delta\alpha$. С учетом двух последних формул, а также полученного ранее соотношения $\Delta\alpha = \omega\Delta t$ имеем $V_2\Delta\alpha = V_2\omega\Delta t = V\cos\varphi\omega\Delta t$. Разделим это «боковое» приращение составляющей скорости V_2 на интервал времени Δt. В результате придем к формуле $w_2 = \omega V_2 = \omega V\cos\varphi$, в которой величина w_2 представляет собой упомянутую выше вторую часть ускорения материальной точки. Направлена она перпендикулярно плоскости канала. Обе части ускорения, т. е. w_1 и w_2, в самом деле равны и имеют одно и то же направление. Таким образом, составляющая ускорения в перпендикулярном к плоскости канала направлении выражается формулой $w_p = w_1 + w_2 = 2\omega V\cos\varphi$. Третья, и последняя, составляющая ускорения, как и полное ускорение в случае неподвижного канала, направлена к центру круговой оси канала. Она равна выражению $w_3 = \frac{V^2}{R}$. Заметим, что при неподвижном канале w_3 становится центростремительным ускорением точки, движущейся со скоростью V по окружности радиуса R, а составляющие w_1 и w_2 обращаются в нуль.

Если материальная точка имеет ускорение, то, согласно второму закону Ньютона, на нее непременно должна действовать сила, равная этому ускорению, умноженному на массу, и точно так же направленная, как ускорение. Поэтому в рассматриваемом случае на точку должна действовать сила со следующими двумя составляющими. Одна из них представляет собой силу, аналогичную упомянутой ранее центростремительной силе F и равную величине $mw_3 = m\frac{V^2}{R}$. Другая, представляющая для нас главный интерес, выражается с учетом полученной ранее формулы для w_p соотношением $Q = mw_p = 2m\omega V\cos\varphi$. Сила Q, согласно только что изложенному, направлена перпендикулярно к плоскости канала. Она называется *кориолисовой силой*.

Назовем ось, вокруг которой с постоянной скоростью вращается канал, *основной осью*. Введем еще дополнительную ось, также расположенную в плоскости канала, но перпендикулярную основной оси, и назовем ее *поперечной осью*. Подвесим теперь канал на этой поперечной оси в подшипниках некоторой рамки, которая может вращаться вокруг основной оси (рис. 10). Если теперь воспрепятствовать повороту канала относительно рамки (т. е. вокруг поперечной оси), то он будет вынужден вместе с последней вращаться вокруг основной оси с угловой скоростью ω. Наличие силы воздействия гладкой стенки канала на материальную точку вызывает, в соответствии с третьим законом Ньютона, равную и

противоположно направленную силу, действующую уже на стенку канала. Выше были вычислены: сила Q, действующая на точку со стороны канала в направлении, перпендикулярном его плоскости, и сила F, действующая на точку в этой плоскости. Поэтому на стенку канала действуют сила Q', равная и противоположно направленная силе Q, и сила F', равная и противоположно направленная силе F. Момент силы Q относительно поперечной оси равен величине $M = Q'h = Qh$, где $h = R\cos\varphi$ — плечо силы Q' (рис. 10). Момент силы F' относительно той же оси равен нулю, так как и сила и ось лежат в одной плоскости.

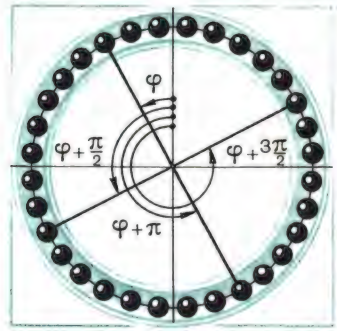
Подставим теперь в выражение для момента $M = Qh$ величину $h = R\cos\varphi$, а также воспользуемся приведенным выше равенством для определения силы Q. В результате придем к формуле для момента M, а именно: $M = 2m\omega V\cos^2\varphi \cdot R$. Этот момент можно рассматривать как усилие, стремящееся повернуть канал вокруг поперечной оси в результате воздействия на его стенку движущейся в нем материальной точки.

Движение кольца в замкнутом круговом канале

Пусть теперь внутри канала движется не одна материальная точка, а целое кольцо. Заменим это кольцо совокупностью $4N$ отдельных связанных друг с другом материальных точек. Тогда придем к выводу, что при вращении канала вокруг основной оси, лежащей в плоскости его круговой оси кольцо будет стремиться повернуть канал вокруг поперечной оси. Момент этого воздействия представляет собой сумму моментов воздействия материальных точек, составляющих кольцо. Эту сумму нетрудно подсчитать, если каждый раз брать, например, по четыре точки, симметрично расположенные на круговой оси канала (рис. 11). Углы, которые определяют положение таких четырех точек на этой окружности, соответственно равны величинам φ; $\varphi+\frac{\pi}{2}$; $\varphi+\pi$; $\varphi+\frac{3\pi}{2}$. Используя простейшие формулы тригонометрии и равенство для определения момента M, получим для суммарного момента воздействия упомянутых четырех точек выражение

$$M_4 = 2m\omega VR\left[\cos^2\varphi+\cos^2\left(\varphi+\frac{\pi}{2}\right)+\right.$$
$$\left.+\cos^2(\varphi+\pi)+\cos^2\left(\varphi+\frac{3\pi}{2}\right)\right] = 4m\omega VR.$$

Рис. 11. Момент давления вращающегося тонкого кольца на стенки канала. Кольцо заменяется $4N$ равностоящими друг от друга материальными точками.



Волчок в карданном подвесе — основной элемент множества точнейших приборов.

Таких четверок материальных точек будет в составе кольца ровно N, т. е. в четыре раза меньше общего числа $4N$ точек, составляющих кольцо. Чтобы подсчитать полный момент M_0 сил воздействия кольца на канал (по-прежнему относительно поперечной оси), следует выражение для момента M_4 умножить на N. Получим формулу $M_0 = m_0\omega VR$, в которой $m_0 = 4Nm$ — полная масса всего кольца.

Обозначим через Ω угловую скорость кольца по отношению к стенкам канала. Тогда составляющая V скорости материальной точки относительно стенок канала определится формулой $V = \Omega R$. Используя ее, равенство для M_0 можно представить теперь в виде

$$M_0 = I\Omega\omega. \qquad (1)$$

Здесь величина $I = m_0R^2$ является так называемым *полярным моментом инерции кольца* относительно его центра, или, что одно и то же, относительно оси, перпендикулярной к плоскости кольца и проходящей через центр его круговой оси.

Волчок в кардановом подвесе

Возьмем теперь вместо канала и вращающегося в нем кольца диск или какое-либо другое тело, также обладающее осевой симметрией. Заставим такое тело вращаться вокруг своей оси симметрии в некоторой рамке с угловой скоростью Ω (рис. 12). Саму рамку, которую назовем *внутренней*, в свою очередь, поместим в другую рамку на другой оси, перпендикулярной первой и лежащей в обеих срединных плоскостях каждой из рамок. И наконец, упомянутую другую рамку, которую будем называть *внешней*, насадим на неподвижную ось, также лежащую в ее срединной плоскости. То, что получилось, называется *гироскопом в карданном под-*

весе. Вращающееся симметричное тело называется *ротором гироскопа*, а иногда собственно гироскопом или просто *волчком*. Примем, кроме того, что трение в подшипниках осей обеих рамок и самого ротора отсутствует.

Ось ротора, ось внутренней рамки и ось внешней рамки пересекаются в одной точке, которая называется *геометрическим центром карданова подвеса*. Заметим, что в данном случае сила тяжести не будет оказывать никакого влияния на поведение гироскопа, если центр тяжести внешней рамки, а также центр тяжести ротора и внутренней рамки будут точно совпадать с геометрическим центром карданова подвеса. Наличие карданова подвеса (т. е. обеих рамок) позволяет оси ротора принимать любое направление, а ему самому — свободно вращаться вокруг своей оси.

Рис. 12. Посредством винта можно устранить вращение гироскопа вокруг горизонтальной оси. При вращении внешнего кольца возникнет момент, стремящийся повернуть внутреннее кольцо относительно внешнего.

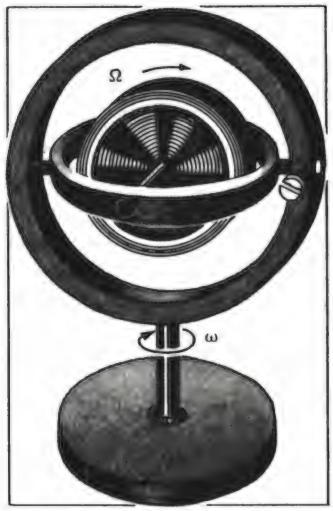
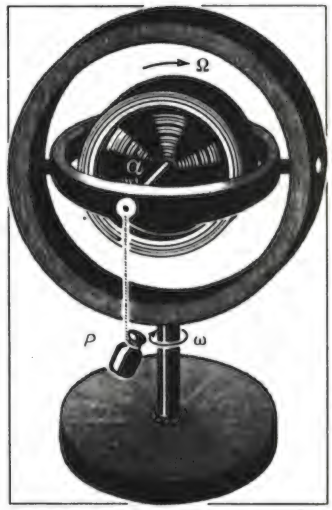


Рис. 13. Грузик P вызывает вращение гироскопа вокруг вертикальной оси.



Гироскопический момент

Зажмем теперь специальным винтом ось внутренней рамки, не позволяя тем самым ей поворачиваться относительно внешней рамки (рис. 12). При этом внешнюю рамку можно заставить вращаться с постоянной угловой скоростью ω вокруг ее неподвижной оси.

Нетрудно прийти к выводу, что ротор гироскопа при таком движении будет стремиться повернуть внутреннюю рамку относительно внешней. В самом деле, ротор можно представить как бы состоящим из большого числа тонких совместно вращающихся колец.

Согласно изложенному выше, каждое из таких колец будет стремиться повернуть внутреннюю рамку вокруг его закрепленной оси. Суммарный момент усилий, развиваемых всеми кольцами относительно закрепленной оси, будет выражаться формулой (1), однако под полярным моментом инерции I следует в ней теперь понимать сумму моментов инерции всех воображаемых колец, составляющих ротор.

Итак, при вращении закрепленных вместе внешнего и внутреннего колец вокруг неподвижной оси внешнего кольца ротор гироскопа стремится повернуть внутреннее кольцо относительно внешнего, развивая при этом момент

$$\Gamma = \omega I \Omega. \qquad (2)$$

Этот момент называется *гироскопическим*.

В силу закона равенства и противоположной направленности действия и противодействия при вращении внешней рамки последняя действует на ротор гироскопа с моментом M той же величины, что и Γ, но в противоположном направлении. Момент M стремится повернуть ротор вместе с внутренней рамкой вокруг оси внутреннего кольца. Почти очевидно, что если устранить зажим, мешающий повороту внутренней рамки относительно внешней, и приложить к первой силу с тем же моментом M относительно ее оси, то ничего не изменится. Внешняя рамка вместе с внутренней и ротором гироскопа будет продолжать вращаться вокруг оси внешней рамки с угловой скоростью ω, а угол между обеими рамками будет оставаться неизменным.

Гироскоп под действием приложенной к нему силы

Расположим ось внешней рамки по-прежнему вертикально, а к внутренней подвесим груз P на расстоянии a от оси внутренней рамки (рис. 13). Момент силы P относительно этой оси при горизонтальном расположении внутренней рамки равен $M = Pa$.

Заставим вращаться внешнюю рамку вместе с внутренней и ротором с такой угловой скоростью, чтобы соблюдалось равенство

$$M = \omega I \Omega, \qquad (3)$$

и во время этого движения отпустим зажим на оси внутренней рамки. Как только что было указано, движение будет продолжаться так, будто бы ничего не случилось. Момент M силы P будет все время

уравновешиваться гироскопическим моментом Γ, значение которого определяется формулой (2). А как будет обстоять дело, если отпустить зажим при отсутствии вращения внешней рамки или при несоблюдении равенства (3)? Тогда в это мгновение не будет равенства между моментом силы тяжести M и гироскопическим моментом Γ, и, следовательно, картина последующего движения будет иной. Так, если внешняя рамка стоит на месте, то внутренняя вместе с ротором гироскопа под действием момента M силы P вначале начнет вращаться вокруг горизонтальной оси. При таком вращении появится возрастающая угловая скорость ω' вокруг этой оси, а следовательно, появится и новый гироскопический момент $\Gamma' = \omega' I\Omega$.

Гироскопический момент Γ' имеет вертикальное направление и, следовательно, будет стремиться повернуть весь гироскоп (т. е. его обе рамки и ротор) вокруг оси внешней рамки. Они придут в ускоренное вращение. Тем самым появится увеличивающаяся со временем их угловая скорость ω вокруг вертикальной оси и соответственно возрастающий со временем гироскопический момент Γ. Последний определяется по-прежнему формулой (2) и направлен против момента M силы P. Настанет мгновение, когда оба момента, т. е. M и Γ, окажутся равными. Однако после этого вращение внешней рамки вовсе не станет равномерным из-за продолжающегося движения внутренней рамки и ротора вокруг горизонтальной оси.

Гироскопический момент будет продолжать разгонять весь гироскоп вокруг вертикальной оси, и, как следствие, будет расти гироскопический момент Γ. Теперь он уже станет в течение некоторого времени превышать момент M силы P. Вращение внутренней рамки гироскопа вокруг горизонтальной оси при этом замедляется, на мгновение останавливается, и рамка начинает вращаться в обратном направлении. Гироскопический момент Γ' при этом меняет знак на обратный и начинает тормозить вращение обеих рамок и ротора вокруг вертикальной оси.

Соответственно уменьшается гироскопический момент Γ и наступает новое мгновение равенства его моменту M силы P. Именно мгновение, так как из-за наличия горизонтальной составляющей угловой скорости ω' внутренней рамки и ротора гироскопический момент Γ' будет продолжать замедлять вращение обеих рамок и ротора вокруг вертикальной оси. В свою очередь, момент M силы P, который теперь уже оказывается больше гироскопического момента Γ, начнет замедлять вращение внутренней рамки и ротора вокруг горизонтальной оси. В результате вновь на мгновение все движение гироскопа, кроме вращения ротора вокруг собственной оси, остановится. Далее описанное движение начнет повторяться снова и снова. Перед нами картина движения, лишь в деталях отличающаяся от псевдорегулярной прецессии детского волчка, описанной в начале статьи. Можно вновь ввести апекс как точку пересечения собственной оси ротора со сферой, построенной вокруг геометрического центра волчка. Этот апекс, как следует из вышеизложенного, совершает движение между двумя горизонтальными окружностями на сфере (рис. 3). Его траектория касается нижней окружности, а на верхней окружности имеет так называемые точки возврата, т. е. подходит к ним и уходит под одним и тем же углом (прямым). Именно в этих точках апекс на мгновение останавливается.

Произведение $I\Omega$, встретившееся в последних формулах, называется *собственным кинетическим моментом* ротора. Обозначается он буквой H. Таким образом, $H = I\Omega$, и гироскопический момент Γ можно определять по формуле:

$$\Gamma = \omega H. \qquad (4)$$

Почему волчок не падает?

Изложенное выше позволяет теперь объяснить движение наклонно поставленного волчка и ответить на вопрос, почему он не падает.

Собственный кинетический момент волчка H выражается формулой $H = I\Omega$. На волчок действует сила тяжести P (рис. 14), которая в данном случае создает момент

$$M = Pa \sin \Theta \qquad (5)$$

относительно горизонтальной прямой, проходящей через точку опоры волчка перпендикулярно к его оси (заметим, что в последней формуле Θ — угол между вертикалью и осью волчка).

Рассмотрим движение волчка в течение малого времени Δt. На это время оденем на волчок воображаемую внутреннюю рамку, чтобы ее ось была горизонтальной и, следовательно, совпадающей с только что упомянутой прямой (рис. 15). На внутреннюю рамку оденем воображаемую внешнюю, ось которой направим по перпендикуляру к горизонтальной оси внутренней рамки и собственной оси волчка. Тогда мы вернемся к только что рассмотренному случаю движения гироскопа в карданном подвесе с той только разницей, что массу каждого кольца следует

Рис. 14. Конец вектора собственного кинетического момента H описывает горизонтальную окружность длиной S. Элемент дуги этой окружности совпадает с элементарным перемещением конца того же вектора при его повороте на угол $\omega\Delta t$ вокруг оси воображаемой внешней рамки. Эта ось перпендикулярна вектору H, т. е. собственной оси гироскопа, и лежит с ней в одной вертикальной плоскости.

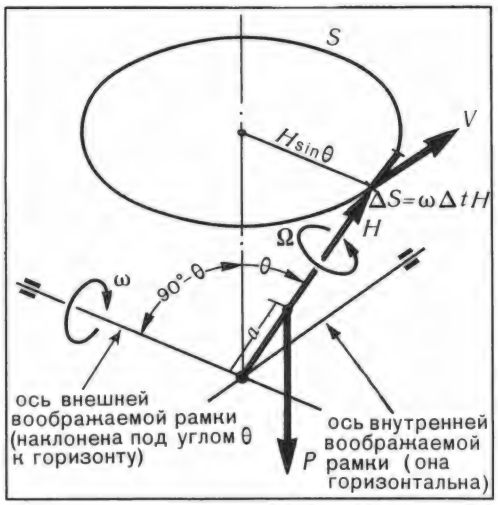


Рис. 15. Воображаемые рамки, объясняющие движение волчка. Угловая скорость внешней рамки ω вызывается моментом силы тяжести P относительно прямой, проходящей через точку опоры перпендикулярно плоскости рисунка. Эта прямая одновременно является осью внутренней рамки, поворачивающейся вместе с внешней.

считать ничтожно малой и не учитывать при исследовании движения волчка. Гироскопические моменты Γ и Γ', описанные выше, будут теперь восприниматься только массой самого волчка.

Остановимся на случае регулярной прецессии. В течение времени Δt воображаемая внешняя рамка вместе с волчком повернется вокруг своей наклонной оси на малый угол $\Delta\alpha$. При этом все точки оси волчка переместятся в горизонтальном направлении. Отложим на оси волчка от точки опоры отрезок, равный по длине величине собственного кинетического момента H (рис. 14), и назовем его *вектором собственного кинетического момента*. Конец этого вектора переместится за время Δt в горизонтальном направлении на расстояние $\Delta S = H\Delta\alpha$, и, следовательно, его линейная скорость будет численно равна величине $V = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} H = \omega H$. Здесь $\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$, как и ранее, угловая скорость внешней рамки. Согласно полученным ранее уравнениям (3), (5) и соотношению $H = I\Omega$ имеем для угловой скорости ω следующее выражение:

$$\omega = \frac{M}{H} = \frac{Pa\sin\Theta}{H}. \qquad (6)$$

Подставим теперь это выражение в формулу $V = \omega H$ для линейной скорости V конца вектора собственного кинетического момента H. Получим:

$$V = M = Pa\sin\Theta. \qquad (7)$$

Таким образом, скорость V конца вектора собственного кинетического момента оказывается численно равной моменту M силы, приложенной к волчку относительно упомянутой выше прямой, проходящей через точку опоры. Очевидно, что при регулярной прецессии конец вектора H будет продолжать перемещаться в горизонтальном направлении и опишет окружность длиной $S = 2\pi H\sin\Theta$ (рис. 14) вокруг вертикальной прямой, проходящей через точку опоры волчка. Если теперь разделить эту длину на скорость $V = Pa\sin\Theta$, с которой конец вектора H движется по окружности, то придем к формуле

$$T = \frac{S}{V} = \frac{2\pi H\sin\Theta}{Pa\sin\Theta} = 2\pi\frac{H}{Pa}, \qquad (8)$$

определяющей время T обращения оси волчка вокруг вертикальной прямой. Это и есть формула для периода регулярной прецессии. Обратим внимание на то, что период прецессии не зависит от угла Θ отклонения волчка от вертикали, о чем уже упоминалось выше.

Как происходит псевдорегулярная прецессия волчка, уже было рассказано в начале этой статьи. Здесь укажем только, что период нутации, т. е. продолжительность повторяющихся изменений угла отклонения оси волчка от вертикали, выражается формулой

$$T = 2\pi\frac{A}{H}, \qquad (9)$$

где A — момент инерции волчка относительно прямой, перпендикулярной оси собственного вращения волчка и проходящей через точку опоры (т. е. сумма произведений масс элементарных частиц волчка на квадрат их расстояния до этой прямой).

Замечательно, что от веса волчка P и от угла Θ отклонения его оси от вертикали период нутации не зависит. Таким образом, один и тот же волчок на Земле и на Луне будет иметь одинаковые периоды нутации, однако в силу формулы (8) период прецессии на Луне будет больше, так как вес волчка на Луне в шесть раз меньше, чем на Земле.

Удивительные свойства волчка используются и в цирке.

Рис. 16. «Спящий» волчок.

«Спящий» волчок

Рассмотрим теперь волчок, ножка которого оканчивается не острием, как это было ранее (рис. 1), а сферической поверхностью, радиус которой невелик (рис. 16). Пусть такой волчок вращается вокруг своей оси симметрии с большой угловой скоростью Ω. Отклоним ось волчка на некоторый угол от вертикали. Тогда заметим любопытное явление: волчок как бы «оживает» и без посторонней помощи ось его симметрии начинает постепенно приближаться к вертикали. Наступит момент, когда ось волчка практически совпадет с вертикалью и ее движение станет почти незаметным: волчок как бы «засыпает». Такой волчок называется *«спящим»*. Теоретические расчеты дают возможность определить минимальную угловую скорость Ω_{min} собственного вращения «спящего» волчка, необходимую для устойчивого его движения. Эта скорость определяется равенством

$$\Omega_{min} = \frac{2}{I}\sqrt{PaA}, \qquad (10)$$

в котором все обозначения те же, что употреблялись и ранее.

Если угловая скорость Ω больше минимальной угловой скорости Ω_{min}, то волчок будет спокойно и устойчиво вращаться вокруг вертикали; если же $\Omega < \Omega_{min}$, то он начнет раскачиваться и в конце концов упадет. Заметим, что, например, для карандаша правая часть последнего равенства соответствует примерно 30 000 об/мин. Вот почему в обычных условиях не удается вращающийся карандаш (в отличие, например, от детского волчка) заставить продолжительное время стоять на острие.

Правило прецессии

Введем вектор момента M пары (т. е. двух равных антипараллельных сил). Этот вектор по длине равен произведению одной из сил P на ее плечо h. Он направлен перпендикулярно плоскости, содержащей обе силы (рис. 17). Положительное направление вектора M выбирается в ту сторону, откуда вращающееся усилие пары представляется происходящим против часовой стрелки.

Теоретические исследования и наблюдения за поведением волчков и гироскопов в кардановом подвесе дают возможность установить правило для определения направления угловой скорости прецессии. Рассмотрим действие на гироскоп пары сил с моментом M (в частности, силы тяжести и силы реакции

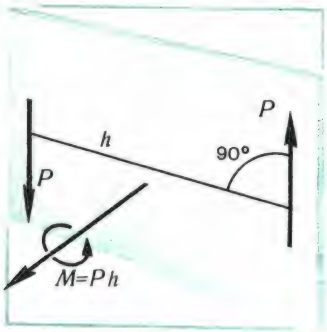


Рис. 17. Момент пары (двух равных антипараллельных сил) — вектор, перпендикулярный плоскости пары. Не меняя действия пары сил на абсолютно твердое тело, ее можно при сохранении численного значения и направления момента видоизменять и переносить куда угодно, даже в параллельную плоскость.

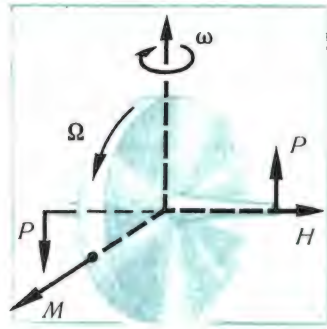


Рис. 18. Прецессия гироскопа, вызванная парой сил, происходит в направлении сближения вектора собственного кинетического момента H с вектором момента пары M. На рисунке: ω — угловая скорость прецессии; Ω — угловая скорость собственного вращения гироскопа.

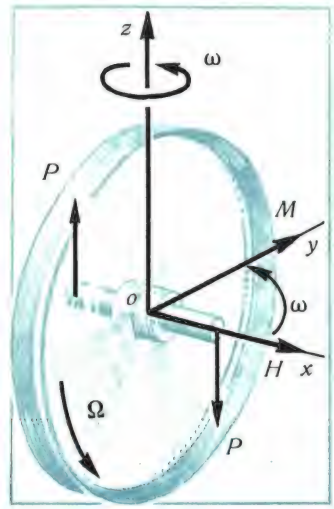


Рис. 19. Опыт с быстро вращающимся колесом. Чтобы повернуть ось колеса в горизонтальной плоскости, следует надавить на нее левой рукой вниз, а правой — вверх.

опоры волчка), перпендикулярным к оси собственного вращения ротора гироскопа (волчка). Гироскоп при этом прецессирует так, что его ось перемещается в плоскости, проходящей через вектор пары M, приближаясь к нему кратчайшим путем (рис. 18).

Опыт с вращающимся колесом

Поясним только что приведенное правило прецессии на простом примере.

Возьмем колесо от детского велосипеда и вставим в его втулку ось. Возьмемся за нее двумя руками так, как показано на рисунке 19, и попробуем повернуть ее в вертикальной плоскости. Оказывается, что сделать это довольно легко, так как невращающееся колесо не оказывает этому повороту никакого сопротивления. Придадим теперь колесу быстрое вращение вокруг его собственной оси с угловой скоростью Ω и вновь попытаемся повернуть его в вертикальной плоскости. С удивлением замечаем, что ось колеса, сопротивляясь этому повороту, поворачивается вместе с тем в горизонтальной плоскости. Объяснить такое необычное поведение колеса довольно легко. Действительно, стремясь повернуть ось колеса в вертикальной плоскости, мы тем самым прикладываем к этой оси пару сил, момент M которой направлен вдоль оси oy (рис. 19). Согласно правилу прецессии, движение оси ox собственного вращения колеса должно происходить так, если бы вектор H стремился к совмещению с вектором M по кратчайшему пути. В результате и будет наблюдаться прецессия оси колеса в горизонтальной плоскости с угловой скоростью ω, указанной на рисунке 19. Нетрудно убедиться в том, что если мы попытаемся повернуть ось вращающегося колеса в горизонтальной плоскости, то на самом деле эта ось будет поворачиваться в плоскости вертикальной.

Двухколесный автомобиль

В 1914 г. на улицах Лондона появился автомобиль необычной конструкции — двухколесный. Конструктором его был наш талантливый соотечественник П. П. Шиловский. На первый взгляд казалось, что устойчивое движение автомобиля сохранялось только во время движения. Однако на остановках автомобиль спокойно останавливался, из него выходили и в него входили пассажиры. При этом автомобиль не опрокидывался — его устойчивое движение сохранялось при помощи гироскопа.

Рис. 20. Схема возникновения момента, воздействующего на гироскоп, в двухколесном автомобиле. Ротор (*1*) помещен во внутреннее кольцо карданова подвеса (*2*). Электрический двигатель (*3*) при помощи зубчатой передачи связан с внутренним кольцом карданова подвеса гироскопа. В кузове переключатель (*4*) заключен в трубку, продольная ось которой смонтирована параллельно оси внутреннего кольца. При наклонах кузова автомобиля шар (*5*), находящийся внутри трубки, смещается в сторону наклона и, замыкая одну из двух пар контактов (*6*), включает электродвигатель. Момент якоря двигателя, усиленный зубчатой передачей, воздействует на гироскоп, создавая момент M вокруг оси внутреннего кольца. В результате гироскоп начнет прецессировать (поворачиваться) вокруг оси AB до тех пор, пока не займет вертикальное положение. При этом шар переключателя сместится в нейтральное положение.

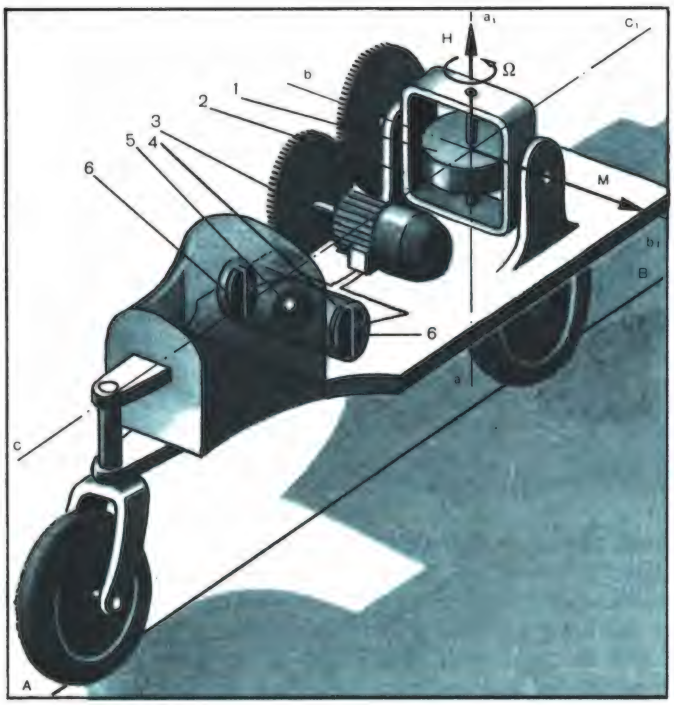


Рис. 21. Гирон — современный двухколесный автомобиль (модель 1961 г.).

Схематическое изображение двухколесного автомобиля показано на рисунке 20. Массивный ротор *(1)*, вращающийся с большой угловой скоростью Ω, имеет вертикальную ось вращения и помещен во внутреннее кольцо карданова подвеса *(2)*. Подшипники оси этого кольца расположены непосредственно на днище кузова автомобиля. Нетрудно заметить, что в данном случае кузов служит внешним кольцом карданова подвеса гироскопа. Таким образом, гироскоп имеет возможность вращаться вокруг трех осей: оси aa_1 — собственного вращения ротора, оси bb_1 — внутреннего кольца и вместе с корпусом автомобиля — вокруг оси AB.

Предположим, что во время движения автомобиль в силу каких-либо причин наклонился в правую сторону. Вместе с автомобилем, естественно, наклонится и гироскоп. Однако можно вызвать такую прецессию гироскопа вокруг оси AB, которая возвратит автомобиль в горизонтальное положение. Согласно правилу прецессии, для создания вращения гироскопа вокруг оси AB следует приложить момент M относительно оси bb_1 внутреннего кольца. При наклоне автомобиля направо воздействующий на гироскоп момент M должен быть направлен в левую сторону (рис. 20). При наклоне же автомобиля налево момент M, естественно, должен быть направлен вправо.

Уже первая модель двухколесного автомобиля показала простоту его устройства и экономичность в изготовлении. Однако первая мировая война 1914 г. помешала П. П. Шиловскому продолжить работу над изобретением, идея создания двухколесного автомобиля была на долгие годы забыта.

В 1961 г. на одной из международных выставок демонстрировался современный двухколесный автомобиль, получивший название *гирон* (рис. 21). Устойчивое движение гирона осуществлялось, как и в автомобиле П. П. Шиловского, посредством гироскопа. В отличие от модели П. П. Шиловского, в гироне имеются два маленьких задних колеса, которые автоматически выдвигаются из кузова машины при снижении скорости ее движения ниже 5 км/ч; они же поддерживают гирон на стоянке, когда гироскоп не работает. Не исключено, что в будущем гирон займет почетное место на транспорте и будет курсировать по магистралям многих стран мира.

Правило Жуковского

Ранее уже отмечалось, что гироскопический момент Γ появляется в том случае, когда волчок быстро вращается вокруг своей оси собственного вращения, а эта последняя вместе с волчком совершает принуди-

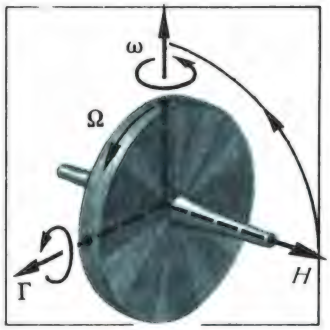


Рис. 22. Вектор гироскопического момента $Г$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы H и ω. Он направлен в ту сторону, откуда совмещение вектора H по кратчайшему пути с вектором ω будет происходить против часовой стрелки.

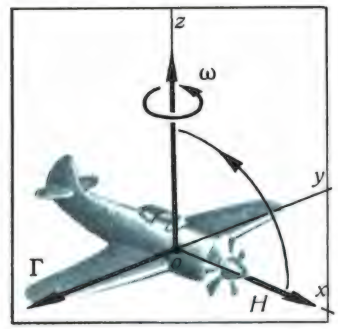


Рис. 23. Согласно правилу Жуковского, момент $Г$ как бы стремится совместить вектор H, т. е. ось винта (пропеллера), по кратчайшему пути с вектором ω. При повороте влево (наличие момента $Г$) самолет кабрирует («нос» поднимается); при повороте самолета вправо он пикирует («нос» опускается).

тельный поворот вокруг новой оси, не совпадающей с осью собственного вращения. Гироскопический момент образует дополнительные давления на подшипники вращающегося тела и в ряде случаев может служить причиной его разрушения или поломки оси тела.

Если проследить внимательно по теоретической части этой статьи, как направлена сила Q воздействия на стенку канала движущейся в нем материальной точки, то можно прийти к следующему правилу о направлении момента $Г$: вектор гироскопического момента $Г$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат вектор собственного кинетического момента H и вектор угловой скорости принудительного вращения ω, и направлен в ту сторону, откуда кратчайший поворот от вектора H к вектору ω виден происходящим против часовой стрелки (рис. 22). Заметим, что это правило впервые было сформулировано русским ученым Н. Е. Жуковским. Оно дает возможность разобраться во многих явлениях, связанных с наличием вращающихся тел в технике и быту. Рассмотрим одно из таких явлений.

Кабрирование и пикирование самолета на вираже

Гироскопический момент — одна из причин возникновения ошибок при управлении самолетом во время его полета. Источником этого момента на самолете является, в частности, воздушный винт (*пропеллер*), который быстро вращается вокруг оси ox, параллельной продольной оси самолета (рис. 23). В данном случае собственный кинетический момент воздушного винта направлен по этой оси и выражается формулой $H = I\Omega$, где I — осевой момент инерции винта, а Ω — угловая скорость его вращения.

Предположим, что вектор H направлен параллельно продольной оси вперед (рис. 23), а самолет начинает *вираж* (поворот) вокруг оси oz влево с угловой скоростью ω. Пользуясь правилом Н. Е. Жуковского, нетрудно сообразить, что возникающий при этом повороте гироскопический момент $Г$ будет направлен вдоль отрицательного направления оси oy. Из-за наличия этого момента «нос» самолета будет подниматься (кабрировать). Если же осуществить при тех же условиях поворот самолета вправо, то, можно сделать вывод о том, что «нос» самолета опустится (самолет будет пикировать). Поэтому, чтобы выровнять самолет, летчику приходится уравновешивать момент $Г$ путем соответствующего управления рулями.

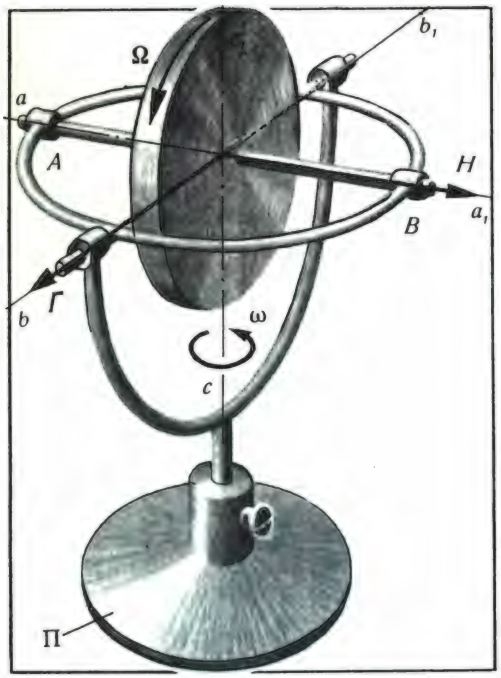
Правило Фуко

Возьмем гироскоп в кардановом подвесе и лишим внешнее его кольцо свободы вращения. Тогда он сможет вращаться вокруг оси ротора aa_1 и вместе с внутренним кольцом вокруг оси последнего bb_1 (рис. 24).

Мы получим так называемый гироскоп с двумя степенями свободы. Поставим его на площадку $П$. Сообщим ротору быстрое вращение с угловой скоростью Ω и начнем, в свою очередь, вращать площадку $П$ вокруг вертикальной оси. Тогда ось гироскопа aa_1 придет в движение относительно внешнего кольца и площадки; после нескольких колебаний она займет вертикальное положение (рис. 25). Переменим направление вращения площадки. Тогда вновь ось гироскопа придет в движение, в результате которого тот конец оси ротора, который был направлен вверх, опустится вниз.

Опрокидывание будет повторяться всякий раз, как только будет меняться направление вращения площадок. Такое поведение гироскопа можно объяснить, если воспользоваться правилом Жуковского. Действительно, согласно этому правилу, в результате принудительного поворота гироскопа вокруг оси cc_1 (оси вращения площадки $П$) появится гироскопический момент $Г$, направленный вдоль оси вращения внутреннего кольца так, как показано на рисунке 24. Наличие этого момента и вынудит ось собственного вращения гироскопа прийти в движение и занять положение, указанное на рисунке 25.

Из изложенного следует, что ось гироскопа с двумя степенями свободы на вращающемся основании устанавливается параллельно оси вращения основа-



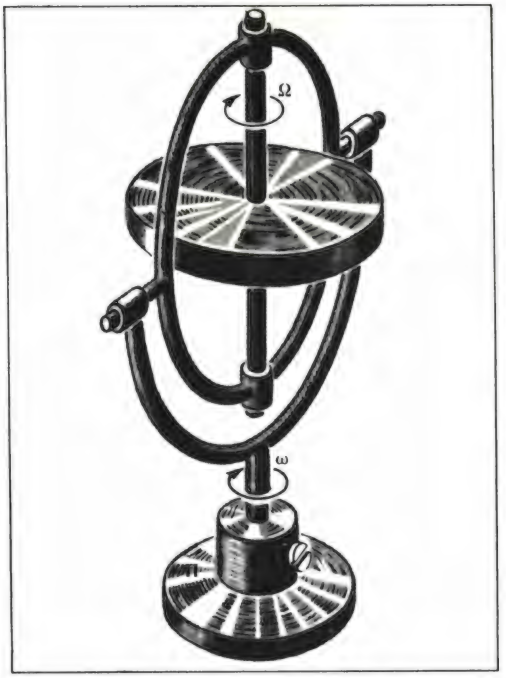


Рис. 24. Гироскоп с двумя степенями свободы. Он имеет свободу вращения лишь вокруг оси ротора aa_1 и оси внутреннего кольца bb_1. Внешнее кольцо не может поворачиваться вокруг своей оси, оно закреплено винтом.

Рис. 25. Гироскоп с двумя степенями свободы (вокруг собственной оси и вокруг оси внутреннего кольца), расположенный на площадке с принудительным вращением. Ось гироскопа устанавливается параллельно оси вращения площадки. При этом направление вращения ротора и направление вращения площадки совпадают.

ния. При этом оси вращения соответственно ротора и основания оказываются направленными в одну и ту же сторону.

Этот факт был впервые установлен Фуко и называется *правилом Фуко.*

Один из гироскопических приборов самолета — гирогоризонт, основным элементом которого является гироскоп в кардановом подвесе.

Использование гироскопов в технике

Удивительная устойчивость, сообщаемая волчку быстрым вращением, долгие годы привлекала внимание ученых и изобретателей.

В 1852 г. французский ученый Леон Фуко на заседании Парижской академии наук продемонстрировал свой первый гироскопический прибор, при помощи которого можно было непосредственно в лаборатории обнаружить факт вращения Земли. С тех пор прошло немногим более 100 лет — крайне незначительный для истории срок. За это время потомки маленького волчка — гироскопы различных назначений и конструкций массой от нескольких граммов до многих тонн нашли широкое применение в технике. Одним из первых гироскопических приборов, который в свое время широко использовался во флоте, был прибор, применявшийся для измерения географической широты месторасположения корабля во время шторма. Волчок служил в этом приборе для определения искусственного горизонта. Несколько позже началось широкое использование гироскопов в военной технике. Так, в 1898 г. австрийский инженер Обри изобрел прибор, известный под названием *прибора Обри* и предназначенный для обеспечения заданного направления движущейся в воде торпеды. Оказалось, что забавная детская игрушка — волчок — способна сеять на Земле смерть, уничтожать человеческие жизни.

В настоящее время гироскопы играют большую роль в исследовании космического пространства, где используются при выводе на орбиту космических кораблей, стабилизации искусственных спутников Земли, при полетах космических аппаратов к Марсу, Венере, Луне. Гироскопы используются на кораблях для стабилизации различных сложных при-

Загадки волчка

На фотографиях вы видите особенный волчок, за которым с одинаковым интересом наблюдают и те, для кого он предназначен,— дети, и два великих физика — Нильс Бор и Вольфганг Паули. Кажется, даже их озадачила эта детская игрушка, которая носит имя великого физика,— волчок Томсона.

Что же в нем интересного? А то, что, запущенный, он кувыркается, постепенно ложится на бок, переворачивается, встает на ножку и продолжает вертеться на ней. Для человека, не знакомого с теорией волчка, это так же необъяснимо, как если бы стол в его комнате вдруг сам собой перевернулся ножками вверх. Ведь, казалось бы, на шарообразной головке волчку стоять легче и удобнее, чем на тоненькой ножке.

Столь необычное поведение волчка было бы нетрудно объяснить на языке формул. Но мы не станем этого делать. Мы лишь напомним про описанный в нашей статье «спящий» волчок, ножка которого также заканчивается сферической поверхностью. Если запустить его наклонно, ось сама собой приблизится к вертикали, т. е. центр тяжести «спящего» волчка стремится занять самое высокое положение.

У волчка Томсона верхушка шарика срезана, центр тяжести волчка поэтому расположен ниже геометрического центра шарика. При любом отклонении волчка от вертикали его центр тяжести поднимается, что хорошо видно на рисунке. А самое высокое положение центр тяжести волчка Томсона занимает, когда волчок переворачивается на ножку.

Применение теории волчка не ограничивается гироскопами и детскими игрушками. Наша Земля — это гигантский волчок, который, как и все волчки, обладает прецессией и нутацией. Планеты, Солнце и звезды тоже волчки. Похоже на волчок и вращение электрона вокруг своей оси (спин) и вокруг ядра атома, и вращение самого ядра атома. Без анализа этих движений, кстати говоря, также обладающих прецессией, невозможны современная теория магнетизма, теория металлов и полупроводников, да и вообще вся современная физика.

боров, для правильного определения места расположения корабля и т. д. Гироскопы помогают летчику управлять самолетом, уверенно ведут его к месту назначения в любое время суток; они широко используются при бурении скважин, строительстве шахт, прокладке штолен метрополитенов, в геодезии. Сейчас уже трудно найти область техники, где бы не использовались гироскопы, гироскопические приборы.

На Земле, под землей и под водой, на широких просторах морей, океанов, в космическом пространстве они помогают людям осуществлять дерзновенные замыслы и мечты, уверенно прокладывать пути к намеченным целям.

Крылатый полет

«Человек,— говорил отец русской авиации Н. Е. Жуковский,— полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума».

По образу и подобию парящих в небе облаков были созданы первые летательные аппараты легче воздуха — воздушные шары, дирижабли, которые и сейчас используются для изучения атмосферы, для решения задач геофизики и метеорологии.

Птицы опираются в полете на воздух; они подсказали человеку принцип летательных аппаратов тяжелее воздуха — планеров, самолетов и вертолетов. Сейчас самолеты летают быстрее звука и превышают скорость артиллерийских снарядов (скорость звука — около 1200 км/ч, снаряда — около 2000 км/ч). Самолеты могут подниматься на 25 и даже на 40 км. Ни одна птица не летает так быстро и так высоко.

Аппараты легче воздуха

Плотность и давление — два параметра, характеризующие состояние воздуха и жидкости. На уровне моря плотность воздуха приблизительно равна 1,3 кг/м^3, а атмосферное давление составляет около 100 кПа. С увеличением высоты плотность и давление воздуха резко уменьшаются. В 40—60 км над поверхностью Земли плотность и давление воздуха уменьшаются в сотни раз.

«Всякое тело, погруженное в жидкость, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость» — этот закон Архимеда может быть отнесен и к воздуху. Поэтому для преодоления силы тяжести надо, чтобы летательный аппарат был очень легким и при этом вытеснял бы значительный объем воздуха.

Первые воздушные шары заполнялись нагретым воздухом: при нагревании воздух расширяется и плотность его уменьшается. Впервые воздушный шар построили в конце XVIII в. во Франции братья Монгольфье (рис. 1). Модель такого шара нетрудно сделать самому. Надо склеить его из долек папиросной бумаги и снизу через отверстие наполнить теплым воздухом, подержав шар, например, над костром. Шар перестанет летать, когда воздух в нем охладится.

Если шар заполнить газом более легким, чем воздух (т. е. с меньшей плотностью), то давление изнутри и снаружи шара можно уравновесить, а оболочку сделать из тонкого легкого материала. Обычно для наполнения воздушных шаров используют водород или гелий: плотность водорода в 14, а гелия в 7 раз меньше плотности воздуха (при одних и тех же давлении и температуре).

Современный воздушный шар с герметической кабиной для человека называется *стратостатом*.

Воздушные шары почти неуправляемы и летят, куда дует ветер. Поэтому сейчас они используются только для научных исследований атмосферы Земли, для разведки погоды, а иногда и для военной разведки. На таких шарах установлена аппаратура, которая передает полученные сведения по радио. В годы второй мировой войны на привязанных воздушных шарах *(аэростатах)* поднимались проволочные противоавиационные заграждения.

Аппаратом легче воздуха можно управлять, снабдив его двигателем и рулями. Управляемый аппарат называется *дирижаблем*. Чтобы сопротивление воздуха было как можно меньше, дирижаблю придают вытянутую сигарообразную форму (рис. 2). Для жесткости его оболочка натянута на металлический каркас. Строились и цельнометаллические дирижабли, внутри которых были расположены резервуары с легким газом. Дирижабль не может летать так же высоко, как стратостат, потому что объем его почти

постоянен. Обычно дирижабли достигают высоты не более 6 км, максимальная скорость—около 150 км/ч.

Строительство дирижаблей развернулось после первой мировой войны. Сначала дирижабли были построены в Германии, затем в США и СССР. Но широкого распространения они не получили. Водород, которым их наполняли, легко воспламенялся (были случаи, когда дирижабли сгорали в воздухе). Дирижабли большого размера могут сломаться, попав в сильный ветер.

Почему летает самолет?

При выстреле из ружья стрелок ощущает отдачу — толчок приклада в плечо. Эта сила действует на приклад ружья очень короткое время — около 0,002 с. Но на станок пулемета эта сила действует почти постоянно, пока пули вылетают из ствола.

Так же и летательный аппарат может получать постоянную подъемную силу, если он непрерывно отбрасывает воздух вниз. Именно для этого и нужны самолету крылья. Если крыло движется горизонтально и при этом поставлено под углом к направлению движения (этот угол называется *углом атаки*), оно отбрасывает встречный воздух вниз (рис. 3) и тем самым создает подъемную силу, направленную вверх. Образование подъемной силы основано на законе механики о количестве движения (второй закон Ньютона):

$$m(v_2 - v_1) = Pt,$$

где m — масса тела (в данном случае это масса отбрасываемого воздуха); $v_2 - v_1$ — изменение скорости тела (в данном случае вертикальная скорость отбрасываемого воздуха); P — сила, действующая на тело, она приложена к воздуху и направлена вниз, и t — время. Следовательно,

$$P = \frac{m}{t}(v_2 - v_1).$$

Так как всякое действие всегда встречает равное по величине и противоположно направленное противодействие (третий закон Ньютона), то подъемная сила Y, равная силе P, будет приложена к крылу самолета и направлена вверх:

$$Y = -P.$$

Подъемная сила зависит от массы ежесекундно отбрасываемого воздуха $\frac{m}{t}$, а она, в свою очередь, пропорциональна плотности воздуха ρ, скорости полета v и площади крыла S; вертикальная скорость воздуха $v_2 - v_1$ пропорциональна углу атаки крыла и скорости полета. Тогда подъемную силу можно определить по формуле:

$$Y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S,$$

где C_y — коэффициент, который зависит от формы крыла и угла атаки.

Итак, подъемную силу можно создавать довольно просто, но для этого обязательно нужно, чтобы крыло в воздухе двигалось. Решается это по-разному: птицы машут крыльями; планеры используют снижение — сопротивление воздуха преодолевается силой тяжести. Самолету же нужен двигатель. Но, может быть, выгоднее повернуть этот двигатель так, чтобы его тяга компенсировала и силу тяжести аппарата? Нет, это невыгодно, так как подъемная сила крыла во много раз больше сопротивления воздуха. Отношение получаемой подъемной силы к сопротивлению называется *аэродинамическим качеством*. Сейчас для дозвуковых самолетов это отношение достигает 25, а для сверхзвуковых — 7.

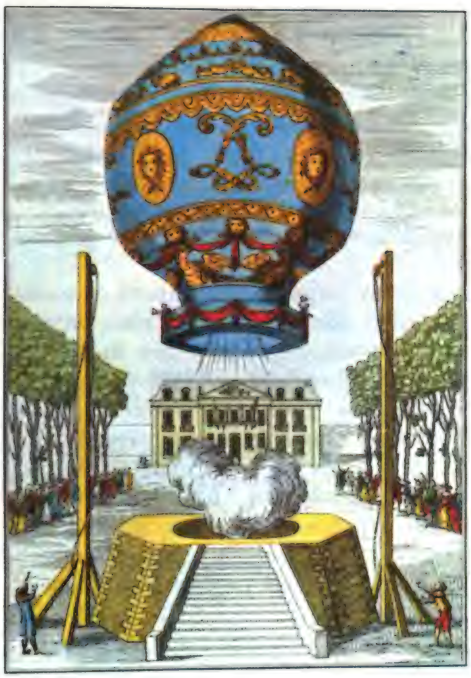
На образовании подъемной силы крыла основан и полет *вертолетов*: если несколько крыльев соединить вместе (получится «ротор» вертолета) и вращать их двигателем, то каждое крыло будет создавать подъемную силу и они поднимут вертолет в воздух. Наклоняя ротор в сторону, вертолет будет двигаться в нужном направлении.

Развитие авиации во многом зависит от открытий и изобретений в различных областях науки и техники, и в первую очередь от развития науки об обтекании тел газом — *аэродинамики*. Основы этой науки заложены исследованиями русских ученых Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, С. А. Христиановича, немецких ученых Л. Прандтля, Т. Кармана и других. Кроме того, большую роль в развитии авиации играют наука о механике полета, материаловедение, изобретения в промышленности, строящей двигатели, и в приборостроении.

Звуковой барьер и тепловой барьер

В 50-х годах XX в. самолеты преодолели звуковой барьер — их скорость стала больше скорости звука (скорость звука в атмосфере равна 300—340 м/с в зависимости от высоты). Преодолеть этот барьер было нелегко.

Рис. 1. Воздушные шары. *Слева направо:* шар Монгольфье наполнен теплым воздухом (1783); воздушный шар, наполненный водородом (1785); стратостат «СССР-1». На этом стратостате в 1933 г. впервые в мире советские стратонавты поднялись на высоту 19 км. На большой высоте из-за малого давления атмосферы стратостат становится шарообразным.



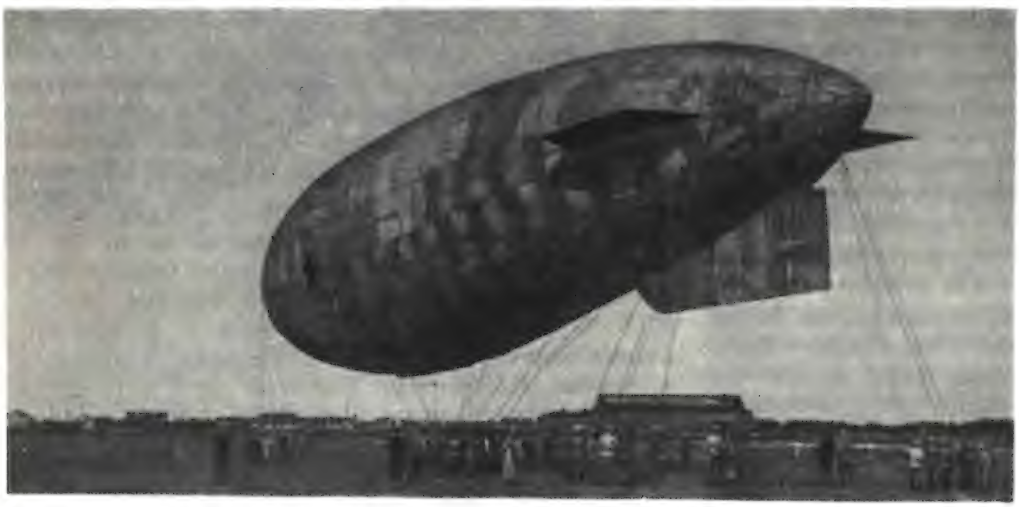


Рис. 2. Дирижабль; двигатель с воздушным винтом прикреплен к кабине.

Когда какое-нибудь тело, например крыло самолета, движется, в воздушной среде возникают *возмущения* в виде волн сжатия и разрежения (рис. 4). Они «подготовляют» воздух к обтеканию крыла: частицы воздуха приобретают скорость и «расступаются» еще до того, как их достигнет передняя кромка крыла.

Но так будет лишь в том случае, если скорость движения крыла меньше скорости звука, с которой распространяются возмущения. Только при этом условии возмущения смогут обогнать крыло и «подготовить» воздух к «встрече» с ним. В результате воздух плавно обтекает крыло.

Если же крыло двигается быстрее, чем звук, то возмущения уже не обгоняют крыло и не «подготавливают» воздух к «встрече». Мало того, распространяясь во все стороны в неподвижном воздухе, эти возмущения будут накопляться, сжимая воздух, как это показано на рисунке 4, вдоль двух линий, которые называются *ударными волнами*. Обтекание крыла уже не будет плавным. Это создает дополнительное, так называемое волновое, сопротивление. Когда

Рис. 3.

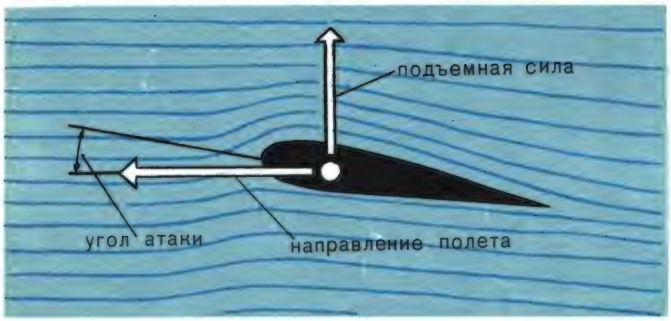


Рис. 4.

самолет пролетает со сверхзвуковой скоростью, то на земле мы слышим как бы удары грома — это доходит до нас ударная волна. Поэтому при сверхзвуковой скорости сопротивление движению значительно больше.

В аэродинамике удобно судить о скорости по отношению скорости полета к скорости звука. Эта величина называется *числом Маха*:

$$M = \frac{\text{скорость полета}}{\text{скорость звука}}.$$

Число $M = 1$ соответствует скорости звука. Чем больше число M, тем сильнее проявляется сжимаемость воздуха. При небольшой дозвуковой скорости, когда число $M < 0{,}7$, сжимаемостью воздуха можно пренебречь.

Преодоление звукового барьера, т. е. завоевание самолетами скоростей, соответствующих числу $M > 1$, потребовало широких исследований. Ученые стремились уменьшить аэродинамическое сопротивление и создать как можно более плавное обтекание самолета. Сейчас летчик даже не замечает, когда самолет превышает скорость звука, а первые попытки получить при пикировании даже околозвуковую скорость на старых самолетах кончались катастрофой: самолет начинало бросать, он переставал быть управляемым.

Ученые и конструкторы продолжают искать, как еще больше увеличить скорость самолета. И тут обнаруживаются новые интересные явления.

Вот самолет подготовлен к скоростному полету. Он выглядит совсем новым, как будто и не совершили на нем множество тренировочных полетов. «Взлет разрешаю!» — передает по радио руководитель полетов, и самолет стремительно уходит ввысь. Через полчаса, когда он идет на посадку, уже известно: в течение нескольких минут самолет превысил скорость звука значительно больше, чем вдвое.

Знакомая во всех деталях машина подруливает к ангару. Но что это? Краска, которой написаны большие опознавательные номера, потемнела и обуглилась; сверкающая металлическая поверхность самолета во многих местах покрылась пятнами; помутнели стекла кабины летчика. Такое впечатление, будто самолет побывал в раскаленной печи. Но ученые и инженеры ждали этого!

Сжатие нагревает газ, и он передает теплоту окружающим предметам. Поэтому нагревается насос, когда накачивают велосипедную шину. То же происходит и на самолете в тех его частях, где воздух сжимается. Иными словами, преодолев звуковой барьер, самолеты встречаются с *тепловым барьером*. Если полет происходит в стратосфере (т. е. выше 11 км), где температура воздуха равна — 56,5° С, то на поверхности самолета при $M = 5$ температура может достигать почти 1000° С.

Все материалы при нагревании становятся менее прочными. Так, у алюминия, который чаще всего применяется в конструкциях самолетов, прочность снижается очень заметно при температуре около 200° С. Чтобы преодолеть тепловой барьер, будут применены новые жаростойкие материалы из металлов и полимеров (уже сейчас для самолетов начинают применять сталь и титан), но, конечно, изменится и форма самолета.

Если еще больше увеличить скорость полета (до числа $M = 10$—15), температура воздуха станет такой высокой, что уже необходимо учитывать изменения физических и химических свойств газов, образующихся у самого крыла. Исследование течения воздуха при таких скоростях началось недавно.

Законы аэродинамики и обтекание крыла

Важнейшие физические законы — закон сохранения энергии и закон сохранения массы — играют существенную роль в аэродинамике.

В простейшем случае, когда воздух ведет себя как несжимаемая жидкость, эти законы выглядят

сравнительно несложно. Вся энергия жидкости складывается из кинетической энергии, которая тем больше, чем больше скорость, и потенциальной, которая определяется статическим давлением в воздухе. Закон сохранения энергии применительно к гидродинамике, сформулированный швейцарским ученым Д. Бернулли, указывает: если скорость жидкости растет, то давление будет уменьшаться; если она уменьшается, давление увеличивается.

Закон сохранения массы говорит о том, что через любое поперечное сечение потока должна проходить в единицу времени одна и та же масса газа. Для несжимаемой жидкости закон этот прост: произведение площади поперечного сечения потока на его скорость есть величина постоянная, т. е. чем меньше поперечное сечение потока, тем больше должна быть скорость. Этот закон наглядно проявляется в течении реки: она течет быстрее там, где ее русло мелкое или узкое. Следовательно, там, где скорость потока жидкости увеличивается, его поперечное сечение становится меньше, а по закону сохранения энергии уменьшается при этом и давление.

Когда скорость течения воздуха близка к числу $M = 1$, уже нельзя пренебрегать сжимаемостью, нужно учитывать, что всякий газ при уменьшении давления расширяется и стремится занять больший объем. При этом происходит борьба двух явлений: с одной стороны, увеличение скорости требует сужения потока, а с другой — это же увеличение скорости приводит к уменьшению давления воздуха, что требует уже расширения потока. Оказывается, при дозвуковых скоростях сильнее первое явление, а при сверхзвуковых — второе.

На рисунке 5 показано, что увеличение скорости при числе $M < 1$ сопровождается сужением потока; самое узкое место потока — при скорости, равной скорости звука. Дальнейшее увеличение скорости расширяет поток.

На рисунке 6 показаны траектории частиц воздуха, когда они обтекают поперечное сечение разных тел *(профиль)*. Профиль крыла как бы раздвигает поток, и отдельные струйки сужаются, причем особенно сильно в верхней передней части профиля. Но там, где струйки сужаются, скорость будет больше, а давление меньше. В результате давление распределяется по профилю, как показано на рисунке 7, *а*. Суммарная подъемная сила направлена вверх и приложена приблизительно на $^1/_4$ ширины профиля. Эта подъемная сила в основном получается благодаря разрежению воздуха над верхней частью крыла.

Когда воздух обтекает крыло со сверхзвуковой скоростью, в нем возникают скачкообразные увеличения плотности. Скачок уплотнения — это линия, перейдя которую скорость сверхзвукового потока резко уменьшается, а давление, следовательно, возрастает. В реальных газах толщина этой линии соответствует всего лишь нескольким расстояниям между молекулами.

На рисунке 7, *б* показано, как воздух обтекает профиль крыла при сверхзвуковой скорости. В этом случае суммарная подъемная сила создается как разрежением воздуха над верхней поверхностью крыла, так и давлением на нижнюю поверхность. Приложена подъемная сила приблизительно в середине профиля.

Чем больше угол атаки, тем сильнее изменяется скорость воздуха, обтекающего крыло, и тем больше подъемная сила. Но при углах атаки 10—20° (в зависимости от формы крыла и его профиля) плавное обтекание нарушается. Наступает, как говорят, «срыв потока»: подъемная сила начинает уменьшаться, а сопротивление резко увеличивается.

Основное сопротивление при дозвуковых скоростях — это *сопротивление трения*. Оно обусловлено тем, что молекулы воздуха как бы прилипают к поверхности тела. При этом в очень узком слое около тела (его называют *пограничным слоем*) частицы воздуха скользят относительно друг друга. А так как воздух обладает вязкостью, от этого скольжения частиц и создается сопротивление. Более гладкие поверхности создают меньшее сопротивление трения. Его можно сделать еще меньше, если отсасывать воздух через мелкие отверстия внутрь тела. В некоторых конструкциях самолетных крыльев такие отверстия применяются.

Если обтекание тела не проходит плавно, а при этом образуются вихри (подобно вихрям за тупой кормой лодки), то это неизбежно увеличит сопротивление тела.

Такое сопротивление называется *вихревым*. Для уменьшения вихревого сопротивления хвостовая часть тела должна быть плавной.

Совсем другие причины вызывают *волновое сопротивление*. Оно возникает только при сверхзвуковых скоростях. Это сопротивление обусловлено потерями энергии, которая затрачивается на образование скачков уплотнения. Волновое сопротивление тем меньше, чем тоньше тело и чем острее его носовая часть. При сверхзвуковой скорости волновое сопротивление — это основная доля общего сопротивления.

Когда угол атаки возрастает, сопротивление увеличивается. Вспомним, что аэродинамическое качество — это отношение подъемной силы к сопротивлению. При малых углах атаки подъемная сила

Рис. 5 *(вверху)*.

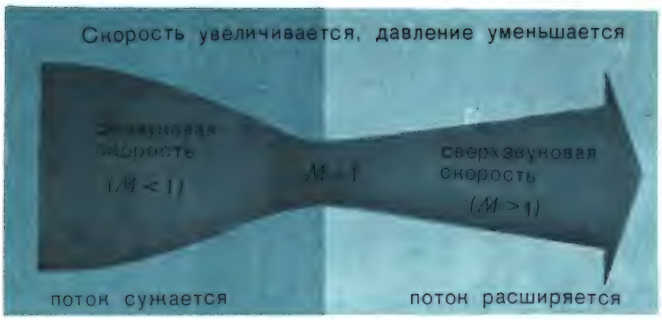


Рис. 6. На рисунке показана сила аэродинамического сопротивления при скорости 800 км/ч у Земли для площадей пластинки, поперечного сечения шара и крыла в 1 м².

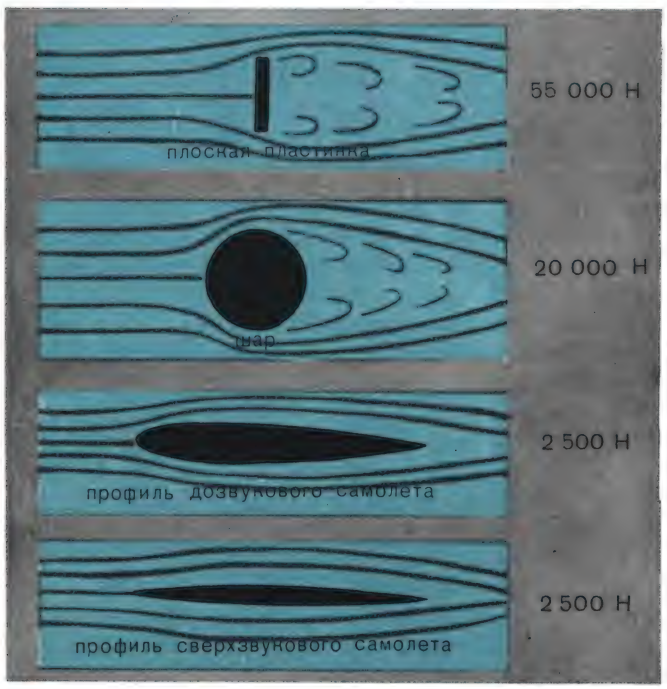
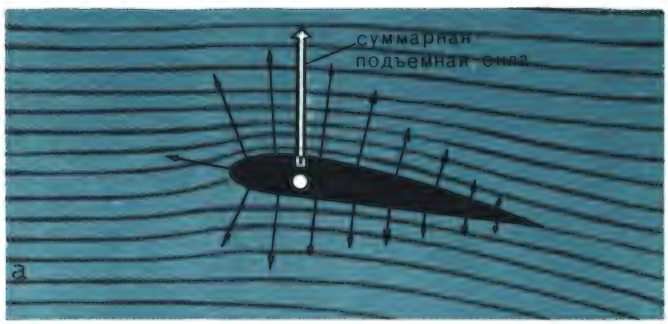
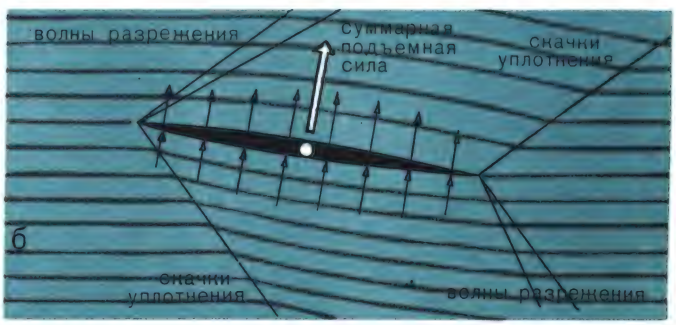


Рис. 7.





близка нулю. Поэтому и аэродинамическое качество мало. При больших углах атаки, когда подъемная сила начинает ослабевать, а сопротивление сильно возрастает, аэродинамическое качество тоже уменьшается. Значит, аэродинамическое качество где-то имеет максимальное значение, обычно при углах атаки 3—5°.

Для дозвуковых самолетов (рис. 8) выгодно применять длинные узкие крылья, чтобы получить большую величину аэродинамического качества. Такие крылья прочны, конечно, только при достаточно большой толщине. А это значит, что при сверхзвуковых скоростях такие крылья непригодны — они оказывают слишком большое сопротивление полету.

Для сверхзвуковых самолетов крылья должны быть тонкими и, следовательно, короткими (малого удлинения). Их обычно делают треугольными или стреловидными (рис. 9), что тоже уменьшает волновое сопротивление и увеличивает аэродинамическое качество.

Аэродинамическое качество сверхзвуковых самолетов пока еще в 2—3 раза меньше, чем дозвуковых. Повышение аэродинамического качества — одна из основных проблем аэродинамики.

Как проверяют результаты расчетов

Многое для самолетов и других летательных аппаратов можно рассчитать теоретически, особенно теперь, с помощью электронно-счетных машин, производящих десятки тысяч вычислений в секунду. Но одних расчетов недостаточно. Важнейший критерий всякой теории — практика. Поэтому, прежде чем строить самолет, надо убедиться, правильны ли расчеты. На помощь приходят аэродинамические трубы: в них изучают, как воздух обтекает модели летательных аппаратов.

В аэродинамических трубах используется принцип относительности движения: в отличие от естественных условий, модель аппарата неподвижна, а воздушный поток движется. Одна из первых дейст-

Рис. 8. Дозвуковые самолеты. *Сверху вниз:* самолет АНТ-25. На этом самолете экипаж В. П. Чкалова в 1937 г. совершил перелет через Северный полюс из СССР в Америку. Пассажирский самолет ЯК-40. Пассажирский самолет ТУ-134.

вующих аэродинамических труб была построена Н. Е. Жуковским в 1902 г. А сейчас уже строят аэродинамические трубы, в которых небольшие самолеты можно исследовать в натуральную величину (рис. 10). Есть даже трубы, позволяющие развивать очень большую скорость воздушного потока — до $M = 15—20$.

Если воздушный поток с большим числом M создавать в аэродинамической трубе непрерывно с помощью вентиляторов, потребовалась бы мощность в сотни тысяч киловатт. Поэтому такие трубы чаще всего рассчитаны на прерывное действие: в них расходуется воздух, заранее накачанный в газгольдеры мощными компрессорами.

В современных аэродинамических трубах можно специальными весами быстро и точно измерить силы, которые действуют на модель. Обтекание модели воздухом можно даже сфотографировать. При этом используют изменение оптических свойств воздуха при изменении давления. А можно просто наклеить на поверхность модели короткие легкие шелковинки, которые будут струиться вместе с потоком воздуха.

Для испытаний в сверхзвуковых аэродинамических трубах изготовляются металлические модели с очень большой точностью — до сотых долей миллиметра.

Аэродинамические исследования летательных аппаратов обычно сосредоточены в больших институтах.

В СССР один из таких институтов — ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского). Он организован по указанию В. И. Ленина в 1919 г. Н. Е. Жуковским и А. Н. Туполевым.

Рис. 9. Сверхзвуковой пассажирский самолет ТУ-144 и сверхзвуковой истребитель МИГ-21 *(вверху слева).*

Рис. 10. Прежде чем самолет поднимется в воздух, его аэродинамические качества исследуются в аэродинамической трубе. Два мощных вентилятора создают воздушный поток, имитирующий естественные условия полета самолета.

Авиационные двигатели

Двигатель нужен самолету, чтобы преодолевать силу сопротивления, а при разгоне и силу инерции. Сила тяги двигателя рассчитывается на основании тех же законов механики, что и подъемная сила крыла.

От всех других двигателей авиационные отличаются тем, что они должны обладать сравнительно малой массой при весьма большой мощности. Если двигатель окажется слишком тяжелым, то самолет не поднимется в воздух или не сможет взять с собой достаточное количество груза. Поэтому авиационные двигатели изготовляют из очень легких и вместе с тем достаточно прочных материалов; их детали всегда максимально облегчены. Но поскольку такие двигатели работают при большой температуре и с большими напряжениями, время их работы до ремонта, как правило, меньше, чем у других двигателей. Сравнительно короткое время работы авиационных двигателей вызвано также требованием особой надежности и безопасности.

Чтобы преобразовать мощность поршневого двигателя в тягу, применяются воздушные винты. Их лопасти, подобно крылу, захватывают воздух и отбрасывают его назад. Это и создает тягу. Теория воздушного винта была создана Н. Е. Жуковским вслед за теорией подъемной силы крыла. На старых самолетах устанавливали деревянные винты. С увеличением скоростей полета потребовалась большая тяга, и винты стали делать из металла.

На сверхзвуковых самолетах воздушные винты не применяются. Здесь тягу создает реактивный двигатель. Реактивные двигатели делятся на два основных типа — *воздушно-реактивные* и *ракетные*.

В простейших воздушно-реактивных двигателях (рис. 11), так называемых *турбореактивных* (ТРД), используется воздух встречного потока. Воздух сжимается специальным компрессором; затем он сильно нагревается в камере сгорания, где горит топливо (например, керосин); далее он проходит в газовую турбину, которая вращает компрессор, и с большой скоростью вытекает назад через реактивное сопло.

Из второго закона Ньютона можно определить, что тяга двигателя равна ежесекундному приросту количества движения воздуха, протекающего через двигатель. Тяга тем больше, чем больше воздуха проходит через двигатель и чем больше увеличивается скорость в выхлопной струе. Скорость же эта тем больше, чем больше температура, достигнутая в результате сгорания топлива.

Однако слишком большую температуру допускать нельзя — турбина может сгореть. Правда, турбины сейчас делают из специальных огнеупорных материалов, которые позволяют повышать температуру потока до 1000° С.

И все же выход для повышения тяги найден. Конструкторы предложили вторично нагревать струю воздуха, сжигая горючее в так называемой форсажной камере уже после того, как эта струя раскрутит турбину компрессора. Это увеличивает тягу двигателя на 30—50%.

Основная часть турбореактивного двигателя — его компрессор, к нему приложена вся тяга двигателя.

Современные мощные турбореактивные двигатели развивают тягу до 150 000 Н, и они должны пропускать много воздуха — более 100 $м^3/с$. Поэтому у передней, открытой навстречу потоку части двигателя — *воздухозаборника* — большие размеры; его внутренний диаметр нередко превышает 1,5 м.

Большая тяга реактивных двигателей требует также и большого расхода топлива. На тягу в 1 кН в течение часа нужно сжигать около 100 кг керосина. Много это или мало? Давайте подсчитаем. Пусть полная масса самолета равна 50 т, тогда на Земле на него действует сила тяжести, равная 500 кН. Если аэродинамическое качество самолета равно 5, то, чтобы преодолеть аэродинамическое сопротивление, двигатель должен развивать тягу не меньше

100 кН. Следовательно, за один час полета двигатель будет расходовать керосина 100 · 100 кг = 10 т. А это $^1/_5$ массы всего самолета! Из этого понятно, какое большое значение имеет экономичность двигателя и аэродинамическое качество самолета.

При большой скорости полета ($M = 2$ или $M = 3$) воздух, пройдя через воздухозаборник, сильно сжимается. Компрессор и турбина становятся ненужными. Поэтому можно применить двигатель другого типа — *прямоточный воздушно-реактивный* (ПВРД). Однако надо помнить, что на малых скоростях такой двигатель работать не будет.

Если добиться, чтобы турбина в ТРД поглощала почти всю энергию разогретого и ускоренного потока, то такая турбина сможет вращать не только компрессор, но и воздушный винт. На этом основана конструкция *турбовинтового двигателя*. Его можно сделать значительно более мощным, чем обычные двигатели внутреннего сгорания. Наибольшая мощность двигателя внутреннего сгорания равна примерно 3000 кВт; при этом в двигателе должно быть не меньше 20 цилиндров. А современный турбовинтовой двигатель развивает мощность до 15 000 кВт. Можно было бы создать и еще более мощные двигатели, но трудно сделать винт, который развивал бы соответствующую тягу и был бы экономичным.

На таких больших самолетах, как ТУ-114, ИЛ-18, АН-10, установлены турбовинтовые двигатели. При скорости полета около 800 км/ч они экономичнее реактивных.

Воздушно-реактивные двигатели создают тягу, отбрасывая назад воздух, взятый из окружающей среды (он же одновременно служит и окислителем при горении топлива). Но с увеличением высоты полета плотность окружающего воздуха уменьшается. Все меньшая масса его проходит через двигатели — тяга падает. Этого недостатка нет у ракетных двигателей, для работы которых нужно иметь запасы и горючего и окислителя. Тяга здесь создается отбрасыванием назад продуктов горения и практически не зависит от плотности окружающей среды.

Ракетные двигатели могут работать на твердом (рис. 12) и на жидком топливе (рис. 13). Двигатели на жидком топливе экономичнее, но требуют очень осторожного обращения, так как и топливо и окислитель обычно ядовиты; в качестве окислителя часто применяется крепкая азотная кислота.

На самолетах ракетные двигатели используются только как вспомогательные — для кратковременных полетов на очень большой высоте или для быстрого взлета. Широко ракетные двигатели применяются на ракетах, где тяга создается на короткое время: для быстрого разгона зенитной ракеты, для подъема и разгона баллистических ракет, для запуска спутников, для разгона и торможения космических кораблей. Ракетный двигатель позволяет получить очень большую тягу. Уже сейчас для запуска космических кораблей создают двигатели с тягой в несколько миллионов ньютонов!

На тех же принципах, что и воздушно-реактивные и ракетные двигатели, будут, очевидно, построены и двигатели будущего. Ученые уже думают о реактивных двигателях, в которых воздух будет нагреваться не за счет тепла, выделяемого керосином или другим химическим топливом при его горении, а с помощью управляемой ядерной реакции, подобно тому как нагревается теплоноситель на атомных электростанциях. Разрабатываются *ионные* двигатели. Они тоже будут работать по реактивному принципу, но в этих двигателях будет отбрасываться не струя газа, а поток ионов. Подумывают ученые и о *фотонных* двигателях, в которых силу тяги создает луч света очень большой силы и интенсивности.

Как выбирают размеры самолета и форму крыла

Чтобы создать самолет, мало знать, как сделать крыло с достаточной подъемной силой и малым сопротивлением и каким должен быть двигатель. При постройке самолета встает множество других важнейших вопросов. Надо правильно выбрать соотношение массы машины и размеров крыла. Надо обеспечить управление самолетом — возможность изменять направление и скорость полета. Самолет в полете должен быть устойчивым, резкая перемена его положения при малейшем порыве ветра недопустима. Самолет должен быть прочным, но не слишком тяжелым. Надо, наконец, дать возможность летчикам определять направление полета и узнавать место, где пролетает самолет.

Одним словом, очень и очень многое надо учесть и предусмотреть конструкторам, чтобы построить самолет безопасный, экономичный и удобный для пилотирования. Широко известны имена наших авиаконструкторов А. Н. Туполева, С. В. Ильюшина, А. И. Микояна, А. С. Яковлева, Н. Н. Поликарпова, П. О. Сухого, О. К. Антонова, под руководством которых построены замечательные самолеты.

С чего же начинается проектирование любого самолета?

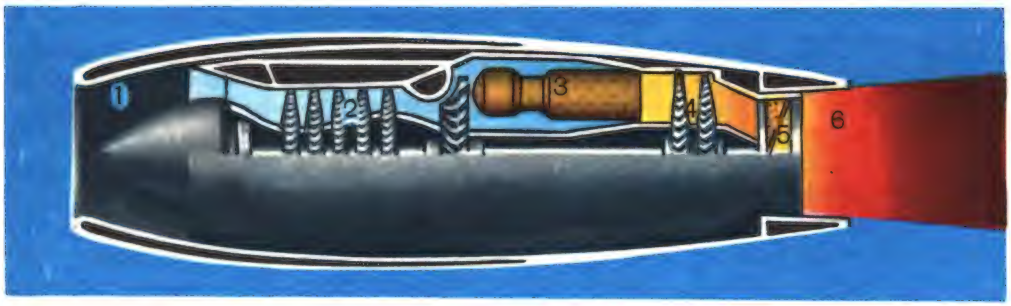


Рис. 11. Схема простейшего турбореактивного двигателя: *1* — воздухозаборник; *2* — компрессор; *3* — камера сгорания; *4* — турбина; *5* — форсажная камера; *6* — сопло.

Рис. 12. Ракетный двигатель на твердом топливе: *1* — пороховая шашка; *2* — камера сгорания; *3* — сопло.

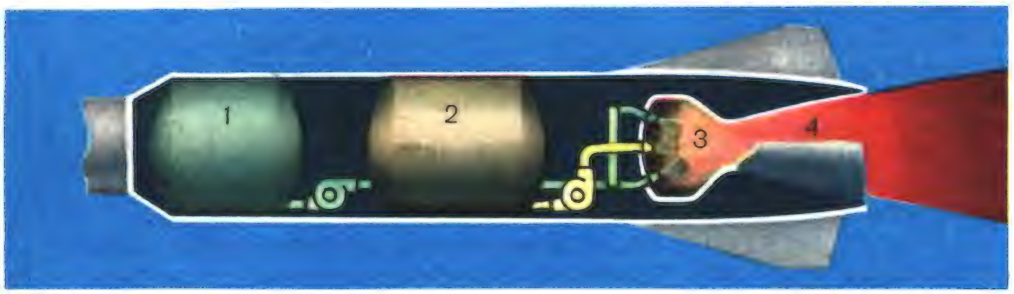


Рис. 13. Ракетный двигатель на жидком топливе: *1* — окислитель; *2* — топливо; *3* — камера сгорания; *4* — сопло.

Прежде всего надо точно определить его назначение и исходя из этого решить, каковы должны быть скорость и высота полета, какой груз поднимет самолет и какое расстояние он должен пролетать. Затем можно приступать к выбору размеров самолета; главная его характеристика — площадь крыла.

После взлета по мере увеличения скорости полета самолет должен уменьшать угол атаки крыла, чтобы подъемная сила оставалась равной силе тяжести. Аэродинамическое сопротивление самолета при этом будет постепенно уменьшаться. Минимальным оно станет при том угле атаки, который соответствует максимальному аэродинамическому качеству (этот угол атаки, как мы уже говорили, равен 3—5°).

Дальнейшее увеличение скорости требует еще меньших углов атаки, но при этом начнется также и увеличение сопротивления. Конструкторы нашли выход — в этом случае можно уменьшить площадь крыла, тогда на каждую часть его площади придется большая часть веса машины. И теперь, чтобы оставить подъемную силу равной весу самолета, нужно вновь увеличить угол атаки. В результате аэродинамическое сопротивление опять уменьшится; оно должно быть минимальным на основной скорости полета.

Таким образом, подбирается *удельная нагрузка на крыло*, которая определяется весом самолета, приходящимся на 1 м^2 крыла. Эта величина у сверхзвуковых самолетов достигает 8000 Па, у тихоходных самолетов — 1200 Па, а у летающих с небольшой скоростью моделей — всего несколько десятков паскалей.

Необходимо учесть также, что взлетная и посадочная скорости самолета должны быть как можно меньше. А для этого, в свою очередь, выгодна небольшая удельная нагрузка на крыло, т. е. надо увеличить площадь крыла. И вот конструктору приходится решать вопрос, какую же площадь крыла выбрать для самолета: сделаешь небольшое кры-

Рис. 14. Самолет с изменяемой стреловидностью крыла в полете. *Вверху* — положение крыла самолета при малых скоростях. При таком положении крыла самолет совершает полеты на большие расстояния, а также выполняет взлет и посадку на небольших площадках. *Внизу* — крылья прижаты к хвосту самолета, и он развивает максимальную скорость.

ло — придется взлетать и садиться на большой скорости; сделаешь большое крыло — нужен более мощный двигатель и самолет не будет экономичным.

Для того чтобы уменьшить взлетно-посадочную скорость самолетов, летающих с большой скоростью, можно, например, изменять в момент посадки или взлета форму и профиль крыла. Наиболее распространенный вид такой, как ее называют, «механизации» крыла — *установка закрылков*. Отклонение их перед взлетом или посадкой увеличивает подъемную силу крыла и позволяет уменьшить взлетно-посадочную скорость.

Но все равно у скоростных самолетов эти скорости намного больше, чем у тихоходных.

У широкоизвестного тихоходного самолета ПО-2, применяемого в сельском хозяйстве, взлетно-посадочная скорость всего 60 км/ч. Современные же сверхзвуковые самолеты взлетают при скорости около 300—400 км/ч, а приземляются при 200—300 км/ч. Посадочная скорость меньше потому, что самолет садится почти без горючего.

Чтобы увеличить подъемную силу крыла на малых скоростях, сейчас часто строят самолеты с крылом изменяемой стреловидности (рис. 14). При малой скорости полета его крыло будет большей площади и большего размаха — он похож на дозвуковой самолет. При переходе к сверхзвуковой скорости крыло «складывается», поворачиваясь на шарнире, и уменьшает свое сопротивление. Однако шарнир поворота крыла — тяжелый, сложный механизм, и за его использование приходится «расплачиваться» уменьшением поднимаемого груза или запаса топлива.

На большой высоте плотность воздуха сильно уменьшается. Поэтому, чтобы крыло сохраняло свою подъемную силу, нужно увеличивать скорость полета.

Летать высоко — это значит летать быстро. Максимальная высота полета, таким образом, зависит в значительной мере от скорости. Практически только на сверхзвуковых скоростях самолет может достичь высоты 20—25 км. Для этого нужны очень мощные двигатели, тяга которых на большой высоте достаточна, чтобы создать необходимую подъемную силу. Современные сверхзвуковые самолеты с реактивными двигателями летают на высоте 20—22 км; в специальных полетах лишь на очень короткое время они могут достигнуть больших высот (до 40 км).

Как управляют самолетом

Управлять самолетом — это значит изменять его положение в полете или противодействовать порывам ветра. Для этого используют как опору окружающий воздух.

Предположим, что летчику нужно вывести самолет из горизонтального положения так, чтобы левое крыло оказалось ниже правого. Такое положение называется *креном влево*. Для этого служат *элероны* — отклоняющиеся рули на крыле (рис. 15). Если элерон на правом крыле отклонить вниз, увеличивая подъемную силу этого крыла, и одновременно отклонить вверх элерон левого крыла, самолет накренится влево.

Для управления по курсу (вправо, влево) служит *руль направления*. Он находится на вертикальном хвостовом оперении (на киле). А для продольного

управления (вверх, вниз) служит *руль высоты*, расположенный на горизонтальном оперении. Для хорошего управления нужно, чтобы все рули были размещены как можно дальше от центра тяжести самолета. Поэтому элероны располагают на концах крыльев, а рули высоты и направления — на хвосте.

Рулем направления летчик управляет, нажимая на педали. Нажал педаль под правой ногой — и руль направления принимает положение, при котором самолет повернет в правую сторону. Элероны и руль высоты присоединены к одному рычагу — к *ручке управления*. Если летчик потянет эту ручку на себя, рули высоты отклонятся вверх. На хвосте возникнет аэродинамическая сила, направленная вниз, которая и заставит самолет увеличить угол атаки. Если же летчик переместит ручку управления влево, то отклонятся элероны и самолет начнет крениться влево.

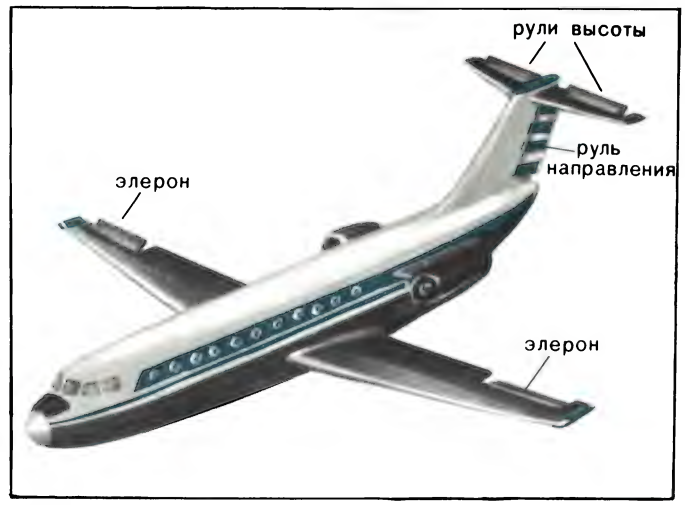
Ручку управления летчик держит правой рукой, а левой управляет тягой двигателя и множеством различных приборов.

На большом самолете, которым управляет не один летчик, а целый экипаж (летчик, бортинженер, радист, штурман), за приборами и двигателем есть кому смотреть, летчик управляет только самолетом. Вместо ручки управления на таком самолете часто ставят штурвал, похожий на «баранку» в автомобиле.

На сверхзвуковых или больших дозвуковых самолетах у летчика не хватит силы, чтобы самому отклонять рули. Тогда в проводку управления встраивают специальные *сервомоторы*, они-то и отклоняют рули, а летчик лишь вводит их в действие. Чаще всего такой механизм представляет собой цилиндр, в котором масло под большим давлением (около 20 МПа) перемещает поршень, связанный с каким-либо из рулей. Такой механизм называется *бустером*, а управление этого типа — *бустерным*. Тяга сервомотора достигает нескольких десятков килоньютонов, потребляемая мощность — нескольких десятков киловатт.

Летчику приходится управлять рулями не только для того, чтобы совершить какой-нибудь маневр. Даже если самолет летит прямо, руль высоты должен быть отклонен. Из механики известно, что для равновесия всякого тела необходимо, чтобы равнодействующая всех сил, действующих на тело, а также момент этих сил равнялись нулю. Подъемная сила крыла уравновешивает вес самолета, тяга двигателя — сопротивление и силу инерции при разгоне, а момент управляющей силы на хвостовом оперении должен уравновешивать момент подъемной

Рис. 15. Расположение на самолете рулей управления.



силы крыла относительно центра тяжести самолета (рис. 16). Чем дальше в самолете расположен центр тяжести от точки приложения подъемной силы крыла, тем большая нужна подъемная сила на оперении.

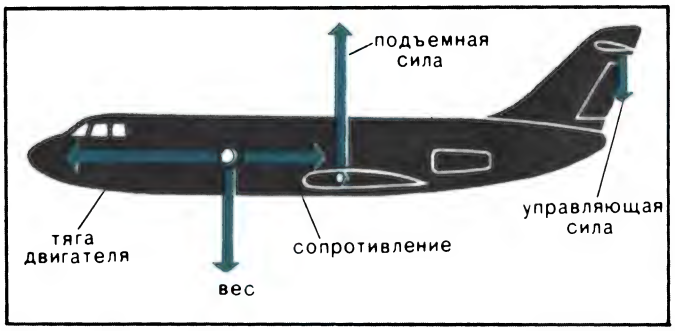
Устойчивость самолета

Бывало так, что самолет не мог совершать полет. Вот он быстро разбежался по аэродрому и ушел в воздух. Но вместо того чтобы плавно набирать высоту, он начинает проделывать непонятные маневры. Будто неведомая сила резко бросает самолет то вверх, то вниз. И летчику нужны мужество и мастерство, чтобы приземлиться обратно на аэродром. Чтобы уяснить, почему такой случай возможен, следует познакомиться с очень важным понятием *устойчивости движения*.

Про шарик, подвешенный на нитке, можно сказать, что он висит устойчиво. При этом мы подразумеваем, что, если шарик отклонить, он сам вернется в прежнее устойчивое положение. А вот поставить на стол торцом карандаш не так-то просто. При слабом дуновении воздуха карандаш упадет — его положение неустойчиво.

Понятие устойчивости можно распространить и на движение любого тела, в том числе и самолета (математическая теория устойчивости движения была разработана А. М. Ляпуновым). Движение, в том числе и полет самолета, называют устойчивым, если при порывах ветра машина сама, без вмеша-

Рис. 16. Силы, действующие на самолет.



тельства летчика, стремится сохранить свое прежнее движение. Для этого нужно, как показано на рисунке 16, расположить центр тяжести впереди *аэродинамического фокуса* самолета, т. е. той точки, где приложена суммарная подъемная сила при изменении угла атаки. Тогда, если по каким-нибудь причинам самолет увеличил свой угол атаки (например, снизу подул ветер), подъемная сила сначала увеличится и самолет начнет подниматься. Но это же увеличение подъемной силы создаст такой момент относительно центра тяжести, который и без вмешательства летчика уменьшит угол атаки самолета опять до прежнего значения.

Горизонтальное оперение можно поместить и спереди (такая схема самолета называется «уткой»), а крыло при этом сдвинуть назад. Но вертикальное оперение для устойчивости необходимо размещать на хвосте. Так же устроен и воздушный змей: роль вертикального оперения играет у него веревочный хвост. А без хвоста змей и летать не будет.

Когда самолет устойчив и хорошо управляем, он может легко и безопасно совершать различные маневры. Простейший маневр — это *разворот*, или *вираж*. Летчик накреняет самолет в сторону поворота, например влево, и составляющая подъемной силы будет разворачивать самолет в ту же сторону. Но чтобы самолет при этом не опустился вниз, надо увеличить подъемную силу. Летчик одновременно с отклонением ручки управления влево тянет ее на себя и тем самым увеличивает угол атаки.

При этом летчик почувствует, что его сильно прижимает к сиденью. Иными словами, он испытывает *перегрузку*. Чем интенсивнее разворот, тем больше требуется угол крена и тем больше перегрузка. В горизонтальном полете перегрузка равна единице, при угле крена 60° — двум, 70° — трем, а 80° — уже шести! Перегрузки возникают при любом маневре самолета, если при этом изменяется подъемная сила, т. е. возникает ускорение. Для легких маневренных самолетов допускается максимальная перегрузка — 10, а для тяжелых или пассажирских — около 2. Тренированный летчик длительное время легко переносит перегрузку, равную 5, а если она действует доли секунды, то 15 и даже 20.

Легкие самолеты могут совершать много *фигур высшего пилотажа* (рис. 17). Высший пилотаж зародился в 1913 г., когда русский летчик П. Н. Нестеров и французский пилот А. Пегу почти в один и тот же день выполнили *«мертвую петлю»*, или, как ее теперь называют, *петлю Нестерова*. Когда скорость самолета была небольшой, высший пилотаж применяли не только для спорта или тренировки летчика, но и в воздушных боях между истребителями.

Но с повышением скорости сильно возрастает радиус разворота. При скорости 500 км/ч радиус разворота около 600 м, а при скорости 1800 км/ч уже около 8 км. При таком развороте легко потерять из виду противника.

Наиболее опасная фигура высшего пилотажа — *штопор*. Угол атаки при штопоре доходит до 70°. Плавное обтекание крыла и оперения нарушается, и отклонение рулей малоэффективно. Поэтому вывести самолет из штопора иногда бывает очень трудно.

Прочность и безопасность

Каждый тип самолета должен пройти в специальных лабораториях испытание на прочность. Если самолет выдерживает нагрузку больше расчетной, это... очень плохо: конструкцию надо облегчить, чтобы самолет мог брать больше горючего или груза.

Очень важно поэтому знать, какие нагрузки в полете будут действовать на самолет. Эти нагрузки будут больше, если самолет должен выполнять различные маневры. Но даже тяжелые, неманевренные самолеты должны выдерживать порывы ветра, скорость которых на высоте около 11 км иногда достигает 200 км/ч.

Самолет может разрушиться в воздухе не только от порыва ветра. Ведь конструкция самолета не может быть, как говорят специалисты, абсолютно жесткой — при нагрузках он деформируется. А при деформациях крыла изменятся и аэродинамические силы. На большой скорости и при неправильной конструкции изменения аэродинамических и инерционных сил могут вызвать очень опасные колебания, которые за несколько секунд способны разрушить са-

кабрирование

пикирование

горка

штопор

бочка

иммельман

петля
нестерова

Рис. 17. Фигуры высшего пилотажа.

молет. Такое явление называется *флаттером*. Предотвращение флаттера — трудная и сложная задача.

Пилотируя самолет, летчик должен быть уверен, что двигатель и все другие основные системы работают нормально, что самолет находится в правильном положении, что скорость полета вполне допустима. Только тогда полет будет безопасным. Этому помогают различные пилотажные приборы и специальные автоматические системы управления. Самые важные из пилотажных приборов — указатель скорости, махметр, высотомер, авиагоризонт, компас. (Подробно об устройстве этих приборов и автопилоте рассказано в ст. «Техника помогает водить самолеты» в т. 5 ДЭ.)

Действия летчика в полете должны быть точными и быстрыми. Поэтому перед тем, как лететь на новом самолете, летчик много часов проводит в кабине, тренируясь в управлении. Для такой тренировки существует даже специальное устройство — *тренажер*. Он состоит из кабины самолета, электрической счетной машины и экрана с проектором. Сигналы при отклонении рычагов управления подаются в счетную машину, которая определяет, как при этом должен двигаться самолет. По сигналам счетной машины изменяются показания приборов и одновременно изменится изображение на экране. Если летчик потянет ручку управления на себя, то сразу изображение горизонта на экране начнет опускаться, как будто действительно самолет увеличил свой угол атаки. Изображение на экране создается подвижным проектором или с помощью телевизионной установки.

Однако, как бы хорошо ни был подготовлен летчик, при больших скоростях ему очень трудно уследить за показаниями всех приборов. Чтобы облегчить ему пилотирование, особенно при длительных полетах, применяют *автопилоты*. Современные самолеты оснащены автопилотами, которые позволяют хорошо летать даже на малоустойчивом самолете, надежно осуществлять посадку в тумане и т. д.

Крылатые ракеты

Крылатые ракеты в принципе почти ничем не отличаются от самолетов, только они летают без летчика. Предназначены такие ракеты главным образом для военных целей: как для обороны, так и для наступления. Строятся и специальные ракеты для исследования условий полета на больших, еще не освоенных скоростях или высотах. Результаты полета таких ракет дополняют исследования в аэродинамических трубах.

Иногда ракету трудно отличить по виду от самолета. У крылатой ракеты могут быть и четыре крыла, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Это делается для того, чтобы маневр ракеты можно было совершать без крена. Ракеты могут стартовать как с земли, так и с самолета. В зависимости от назначения различают ракеты «воздух — воздух», «земля — воздух», «воздух — земля», «воздух — вода» и т. п. Например, ракета «земля — воздух» стартует с земли и предназначена для поражения воздушных целей (самолетов или ракет противника). Ракета «воздух — земля» стартует с самолета и поражает цель на земле. Ракеты управляются автоматически; наводят их на цель обычно с помощью радиолокатора. Чтобы достигнуть большой скорости (до $M = 6$), на ракетах устанавливают воздушно-реактивные или ракетные двигатели (см. ст. «Полет в космос»).

Пути дальнейшего развития авиации

Уже вступают в эксплуатацию первые пассажирские сверхзвуковые самолеты со скоростью 2000—2500 км/ч: советский ТУ-144 и англо-французский «Конкорд». Представьте себе, как сократятся тогда расстояния! Ехать из Хабаровска в Москву на поезде нужно больше недели; на воздушном лайнере ТУ-114 этот путь занимает 8 ч, а сверхзвуковой самолет сможет пройти его всего за 3 ч.

Если лететь с востока на запад, то при полете на сверхзвуковом самолете можно «обогнать» время. Если бы мы вылетали из Хабаровска на таком самолете сразу после встречи Нового года, скажем в час ночи, когда в Москве 7 ч вечера, то в столицу мы прибыли бы в 10 ч вечера прошедшего года. Одним словом, мы смогли бы встретить Новый год дважды.

Самолеты, особенно тяжелые сверхзвуковые, требуют для взлета и посадки специальных аэродромов с длинными (3—4 км) бетонными взлетно-посадочными полосами. Строительство таких аэродромов обходится очень дорого, а в горных районах практически вообще невозможно. Поэтому будущие самолеты должны иметь возможность взлетать и садиться либо вертикально, либо на маленьких аэродромах. Такого типа опытные самолеты уже по-

Проектируемый аэробус ИЛ-86 сможет вместить 350 пассажиров. Двухпалубный воздушный корабль будет мчаться со скоростью 950 км/ч.

строены. На них устанавливаются или дополнительные вертикально расположенные двигатели, или специальные устройства для поворота струй от основных двигателей вниз.

Авиационная техника будет развиваться и дальше. Уже сейчас разрабатываются проекты *гиперзвуковых воздушно-космических самолетов*. Такой самолет будет обладать скоростью, соответствующей числу $M = 5$, даже $M = 10$ и более, и сможет «выпрыгивать» из атмосферы Земли. При входе в атмосферу самолет «отскочит» от нее, подобно плоскому камню, брошенному вдоль поверхности воды, облетит вокруг Земли, войдет в атмосферу и выберет место посадки.

Такой самолет может быть и последней ступенью ракеты, которая возвращается на Землю после дальнего космического полета. Но чтобы создать самолет такого типа, нужно решить еще много проблем, и первая из них — преодолеть тепловой барьер, с которым вы познакомились в начале статьи.

Полет в космос

С берега Вселенной, которым стала священная земля нашей Родины, не раз уйдут еще в неизведанные дали советские корабли, поднимаемые мощными ракетами-носителями. И каждый их полет и возвращение будет великим праздником советского народа, всего передового человечества — победой разума и прогресса!

С. П. Королев

12 апреля 1961 г. началась эра полетов человека в космос. С этого дня перед человечеством открылось новое обширное поле деятельности, огромный мир, связанный с исследованием и освоением космического пространства, мир космонавтики, самой передовой науки и техники, мир мужественных и смелых людей. Во всем мире 12 апреля отмечается как День космонавтики.

Знакомьтесь — «Союз»

Огромная серебристая ракета, окруженная башнями и фермами обслуживания, покрыта легкими облачками испаряющегося кислорода. До старта остается около двух часов. Экипаж корабля поднимается на лифте на верхнюю площадку и через входной люк попадает в верхний отсек корабля. Затем спускается через переходной люк в следующий отсек. Оба люка герметично закрываются.

Космонавты удобно размещаются в креслах. В центральном кресле находится командир корабля, справа от него бортинженер, слева — инженер-испытатель.

В оставшееся до старта время космонавты обычно проверяют исходное состояние систем, средства связи. Они осматривают многочисленные приборы и

Сергей Павлович Королев (1906—1966). Академик, дважды Герой Социалистического Труда. Главный конструктор первых ракетно-космических систем.

индикаторы, включают различные кнопки и клавиши на пультах.

Космический корабль, о котором идет речь, называется «Союз». Это корабль, предназначенный для полетов вокруг Земли. Он пришел на смену первым пилотируемым космическим аппаратам типа «Восток» и «Восход». «Союз» может стыковаться с другими кораблями, выполнять сложные маневры на орбите и при спуске. У него более совершенное оборудование.

«Союз» состоит из трех основных отсеков: кабины космонавтов, орбитального и приборно-агрегатного отсеков.

Кабину космонавтов называют также *спускаемым аппаратом*. В ней экипаж находится при выведении корабля на орбиту, во время выполнения в полете некоторых операций, в ней экипаж возвращается на Землю. Здесь помещается командная рубка корабля, находится разнообразное оборудование, а также запасы пищи и воды. В специальных контейнерах — основная и запасная парашютные системы. Корпус кабины герметичен. Снаружи на него нанесено теплозащитное покрытие для предохранения от интенсивного аэродинамического нагрева при спуске на Землю. На корпусе установлены реактивные двигатели, управляющие разворотом аппарата во время спуска, а также пороховые двигатели мягкой посадки. Снаружи они прикрыты теплозащитным экраном.

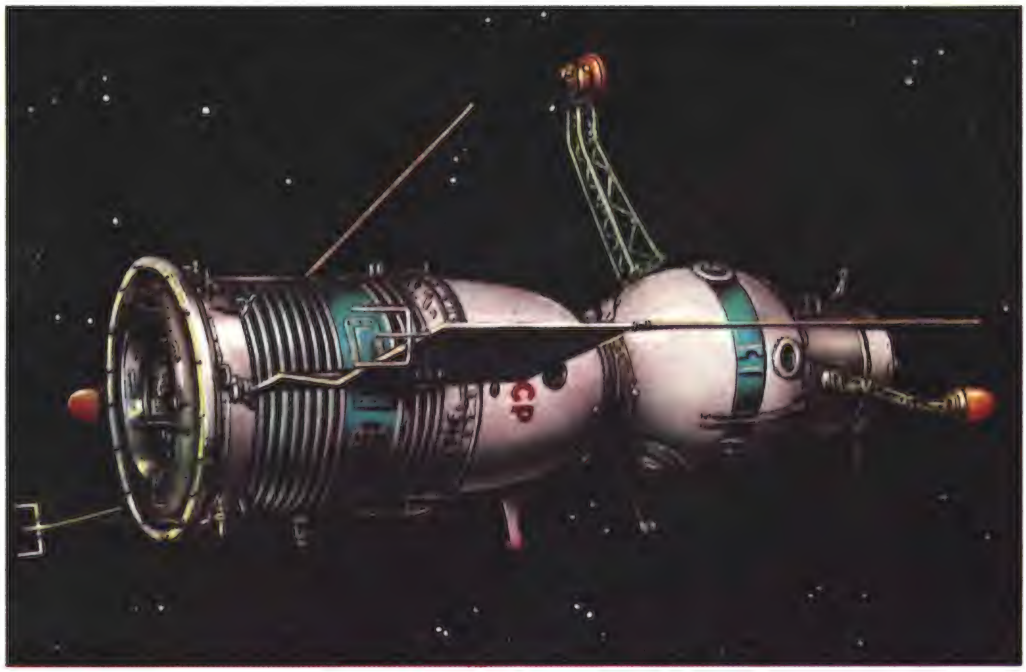
Перед креслом командира установлен пульт управления кораблем. Слева и справа от центрального пульта располагаются боковые вспомогательные пульты. На специальном иллюминаторе установлен оптический *визир-ориентатор*. По бокам кресла командира две ручки управления кораблем: правая — для управления ориентацией корабля вокруг центра масс, левая — для изменения скорости корабля при маневрировании. Кабина снабжена двумя иллюминаторами для визуального наблюдения, кино- и фотосъемки. Оборудование корабля, при необходимости, позволяет пилотировать корабль без участия наземного командного комплекса.

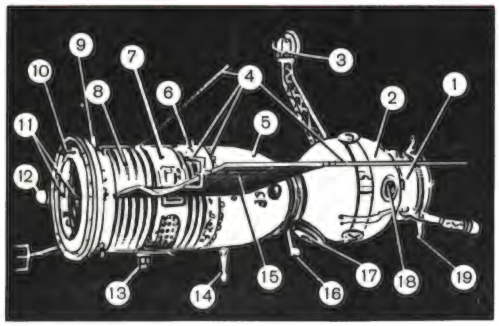
С помощью системы терморегулирования и регенерации в кабине корабля поддерживаются нормальные условия жизни — давление, газовый состав, температура и влажность. Экипаж в полете может находиться в обычной одежде, без скафандров.

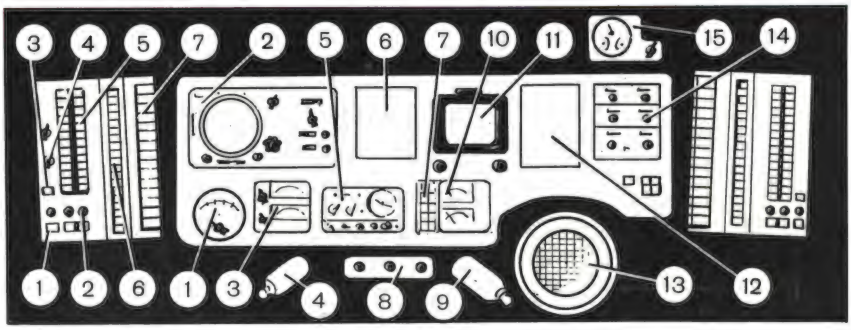
Кабина космонавтов с помощью герметичного люка сообщается с *орбитальным отсеком*, предназначенным для научных наблюдений и исследований, для выхода в открытое космическое пространство, а также для отдыха космонавтов. В орбитальном отсеке, кроме аппаратуры специальной связи, находится всеволновый радиоприемник.

Когда орбитальный отсек используется как шлюзовая камера для выхода в космос, он оборудуется системой шлюзования. Выходят космонавты через люк, который открывается и автоматически, и вручную. Для стыковки с другими космическими аппаратами «Союз» оснащается устройствами, которые устанавливаются в передней части орбитального отсека. С их помощью происходит жесткое соединение аппаратов, стыковка их электрических и гидравлических коммуникаций. Стыковочные узлы снабжаются люками с герметическими крышками, открыв которые после стыковки можно перейти из одного космического аппарата в другой.

С противоположной стороны к кабине космонавтов примыкает *приборно-агрегатный отсек*. В нем размещаются основная бортовая аппаратура и двигательные установки корабля, работающие в орбитальном полете. В герметической части этого отсека находятся системы терморегулирования, системы электропитания, аппаратура радиосвязи и радиотелеметрии, приборы системы ориентации и управления движением со счетно-решающими устройствами. В приборно-агрегатном отсеке размещена жидкостная реактивная установка, которая используется для маневрирования корабля на орбите, а также для спуска его на Землю. Состоит она из двух двигателей, каждый тягой по 4 кН (килоньютона). Для ориентации и перемещений корабля при маневрировании имеется система двигателей малой тяги.





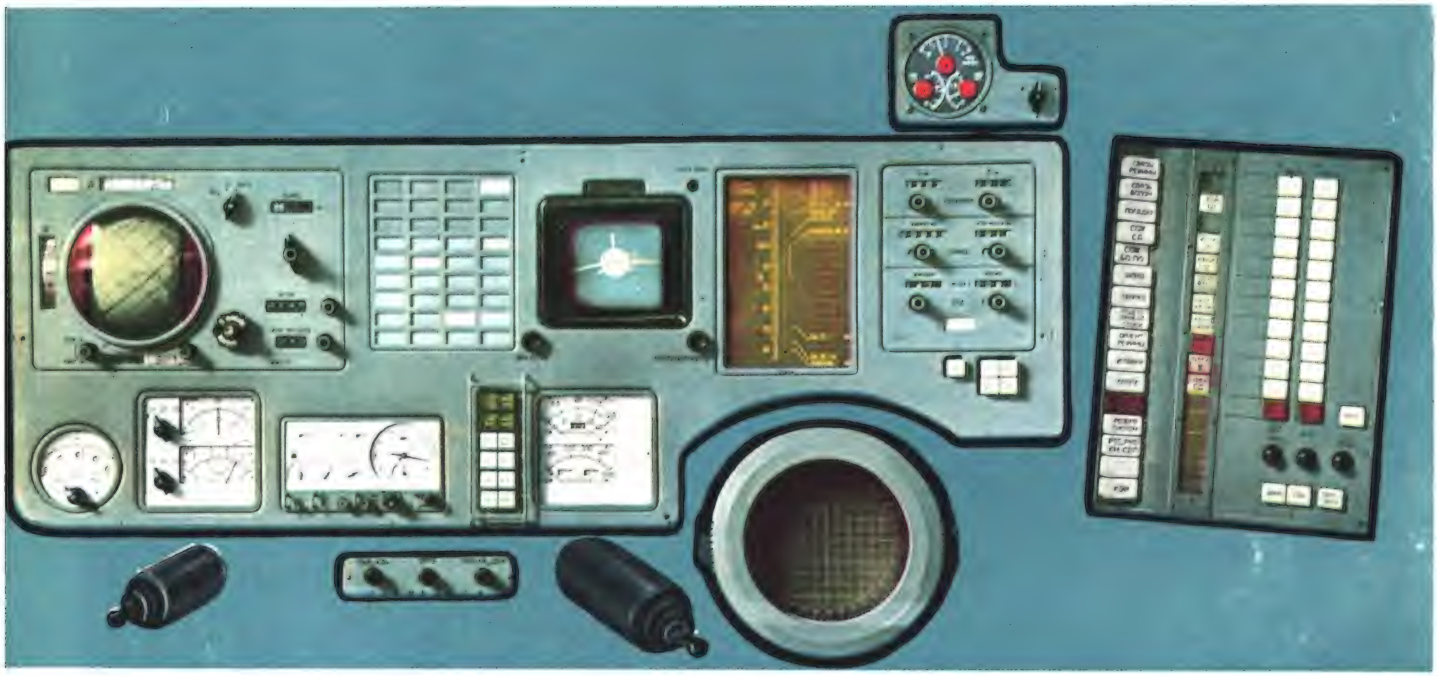


Космический корабль «Союз» и приборы управления кораблем.

Устройство корабля «Союз»:
1 — кожух стыковочного узла;
2 — орбитальный отсек;
3 — антенна точного наведения системы стыковки; *4* — антенны для связи с Землей, между кораблями, передачи телеметрической информации и проведения траекторных измерений;
5 — спускаемый аппарат (отсек экипажа);
6 — двигатели причаливания;
7 — приборно-агрегатный отсек; *8* — радиатор системы терморегулирования;
9 — двигатели причаливания;
10 — ионные датчики;
11 — двигатели для маневров на орбите и для торможения при посадке;
12 — антенна поиска системы стыковки;
13 — датчик системы ориентации;
14 — оптический визир-ориентатор; *15* — панель солнечных батарей;
16 — световой индекс;
17 — входной люк;
18 — иллюминатор орбитального отсека;
19 — световой индекс.

Приборы управления космическим кораблем «Союз».

Командно-сигнальное устройство *(слева и справа): 1* — кнопки включения микрофонов и ларингофонов;
2 — регуляторы громкости КВ, УКВ радиостанций, внутреннего переговорного устройства и дальнего радиокомпаса;
3 — кнопка контроля транспаранта сигнализации; *4* — задатчики температуры воздуха в отсеке и жидкости в системе терморегулирования;
5 — кнопки управления режимами и системами;
6 — транспарант сигнализации;
7 — кнопки режимов.
Пульт космонавтов *(в центре)*: *1* — индикатор напряжения и тока;
2 — индикатор навигационный космический — «Глобус»;
3 — индикатор давления и температуры в отсеках;
4 — ручка управления перемещением корабля;
5 — бортовые часы; *6* — электролюминесцентная сигнализация основных систем;
7 — кнопки управления командно-сигнальным устройством; *8* — регуляторы громкости;
9 — ручка управления ориентацией;
10 — индикатор расстояния и скорости;
11 — комбинированный электронно-лучевой индикатор;
12 — индикатор контроля программ; *13* — визир-ориентатор; *14* — блок цифровой информации;
15 — индикатор шлюзования и ранца скафандра.



До старта осталось...

Накануне старта на космодроме, в огромном монтажно-испытательном корпусе, был выполнен монтаж блоков ракеты-носителя, проведены поагрегатные проверки ее систем, сборка блоков космического корабля и стыковка его с последней ступенью ракеты-носителя. После того как закончился монтаж и были соединены бортовые кабельные цепи, состоялась тщательная проверка всего ракетно-космического комплекса. Затем ракету на ложементах — опорах, смонтированных на железнодорожном установщике, доставили на стартовую площадку, где установили на стартовый стол. Потом к ракете подвели фермы обслуживания и заправочную кабель-мачту. В этих конструкциях уложены заправочные трубопроводы, по которым подаются компоненты топлива и сжатые газы. Здесь также проходят электрокабели, питающие до старта ракеты ее бортовую аппаратуру, кабели цепей контрольно-измерительной аппаратуры и телеметрии.

При установке ракеты на стартовый стол ей придали строго вертикальное положение. Было выдержано направление плоскости полета, азимут траектории — угол между плоскостью траектории и направлением на север. Затем соединили трубопроводы заправочных и дренажных устройств, штепсельные разъемы наземных и бортовых кабельных цепей.

Незадолго до старта начинается автоматизированный процесс заправки топливных баков ракеты

топливом и сжатыми газами. Перед заправкой трубопроводы и баки окислителя — жидкого кислорода — продули азотом, чтобы удалить из них остатки влаги и воздуха, во избежание возникновения кристаллов льда.

Кислород, заправляемый в баки ракеты, испаряется, поэтому постоянно идет подпитка и дренаж (отвод) продуктов испарения. Вот почему ракета на старте как бы окутана клубами пара. Это выбрасываются в пространство пары жидкого кислорода.

В запоминающее устройство бортовой системы управления вводятся данные, которые настраивают систему управления на выполнение определенной программы выведения корабля на орбиту.

Шахматный матч «Земля — космос». Партия между руководителем полета (Земля) и космонавтом (передача из космоса). Кадр из документального фильма «10 лет космической эры».

Сборка космического корабля в монтажно-испытательном корпусе.

Процесс заправки, а затем предстартовые операции определяют соответствующие готовности ракеты-носителя, которые сообщаются по громкой связи с пульта управления полетом. Когда все предстартовые работы заканчиваются, специалисты стартовой команды уходят в укрытие. Объявляется пятиминутная готовность.

Космос — новая стихия

Покоряя пространства, человек создавал различные средства передвижения по суше, по воде, по воздуху. Он не был ограничен в скорости передвижения, а передвигался с любой доступной ему скоростью. Однако космический корабль существенно отличается от всех движущихся аппаратов. Чтобы космический корабль вышел на орбиту искусственного спутника Земли, ему нужна определенная скорость, т. е. скорость, равная почти 28 000 км/ч. Чтобы сообщить кораблю такую скорость, необходимы мощные двигатели, работающие на *реактивном принципе* — создающие силу тяги в результате истечения струи газов.

Дело в том, что в космосе движущийся аппарат практически не взаимодействует со средой. Поэтому здесь не применимы те же двигатели, движители, органы управления, что на суше, в воде и воздухе. Чтобы маневрировать, уменьшать или увеличивать скорость, придавать космическому кораблю определенное положение в пространстве, нужно отбрасывать какую-то массу, взятую с собой на борт. Попробуйте, находясь в лодке, бросить тяжелый предмет — лодка тотчас двинется в противоположном направлении. Это и есть реактивный принцип движения.

Сколько же энергии нужно израсходовать для того, чтобы ракета могла достигнуть нужной скорости полета? Ответ дает *теория реактивного движения*, созданная русским ученым Константином Эдуардовичем Циолковским.

Источником энергии в реактивном двигателе является топливо. Химическая энергия топлива преобразуется в кинетическую энергию газового потока, истекающего из сопла. Чем большим запасом энергии обладает каждый килограмм топлива и чем совершеннее двигатель, тем большую скорость истечения приобретают продукты сгорания.

Циолковский установил зависимость скорости ракеты от количества заправленного в нее топлива и от скорости истечения продуктов сгорания из сопла двигателя. Эта зависимость выражается *формулой Циолковского:*

$$V = W \ln \frac{M_0}{M_к} = W \ln \left(1 + \frac{M_т}{M_к}\right),$$

где V — скорость ракеты; W — скорость истечения газа; M_0 — начальная масса ракеты; $M_к$ — конечная масса ракеты, т. е. масса ракеты, оставшаяся после израсходования массы топлива $M_т$.

Отношение рабочего запаса массы топлива к конечной массе ракеты после израсходования топлива носит название *числа Циолковского*:

$$Z = \frac{M_т}{M_к}.$$

Чем больше топлива находится на борту ракеты, тем больше число Циолковского и соответственно

больше достигаемая ракетой скорость. При этом речь идет не об абсолютных запасах топлива, а об отношении массы топлива к массе полезного груза и конструкции ракеты. Чтобы ракета могла достигнуть возможно большей скорости полета и смогла вывести на орбиту наибольшую полезную нагрузку, стремятся сделать ее конструкцию наилегчайшей.

Орбита — путь корабля

Путь космического аппарата — *орбита* (когда он движется вокруг Земли) или *трасса* (когда он летит к планетам). В том и другом случае направление движения задается ему в течение нескольких минут, когда работают двигатели ракеты-носителя. В эти считанные минуты аппарат набирает высоту и нужную конечную скорость. Дальнейший многосуточный полет происходит с выключенным двигателем по законам небесной механики, под воздействием сил притяжения Солнца и планет. Часто космический аппарат отделяется от последней ступени ракеты-носителя и совершает полет самостоятельно, располагая лишь небольшими двигателями для стабилизации и ориентации в пространстве, для коррекции траектории и торможения при посадке.

Чтобы вывести аппарат на орбиту искусственного спутника Земли, направить его к Луне или Марсу, необходимо точно рассчитать траекторию движения и обеспечить ракете-носителю строго расчетную скорость. Успех всего полета решается на активном участке. Поэтому правильный расчет активного участка является главным, определяющим.

Для того чтобы спутник стал спутником, а космический корабль достиг Луны или Марса, надо к моменту окончания работы двигателей ракет-носителей вывести аппараты в строго определенные точки пространства над поверхностью Земли, сообщив им точно рассчитанные по размеру и направлению скорости.

Несоблюдение этих условий обрекает полет на неудачу. Например, аппарат не достигнет Луны при отклонении скорости ракеты в конце активного участка всего на несколько метров в секунду или направления на десятую долю градуса.

Для определения скорости ракеты пользуются формулой Циолковского. Однако эта формула представляет собой уравнение движения ракеты в свободном пространстве, где на ракету, кроме силы тяги двигателя, не действуют ни сила сопротивления воздуха, ни силы притяжения Солнца, Земли и других планет. А ведь активный участок ракеты проходит вблизи Земли, причем большая его часть в достаточно плотных слоях атмосферы. Поэтому притяжение Земли, сопротивление атмосферы

Космический корабль «Восток» с последней ступенью ракеты-носителя.

Космодром Байконур. На стартовой позиции.

уменьшают ее скорость. Чтобы вычислить скорость ракеты, необходимо знать ее массу, размеры, форму, а также время, в течение которого ракета будет набирать скорость. При решении этой задачи приходится иметь дело с непрерывно изменяющимися величинами: по мере расходования топлива меняется масса ракеты, происходит отделение отработавших ступеней, все время увеличивается скорость, а с высотой изменяется плотность атмосферы.

Русский ученый Иван Всеволодович Мещерский разработал основы механики тел переменной массы и составил уравнение движения точки переменной массы в общем случае. По этому уравнению и производится расчет активного участка полета ракеты. Для каждого момента времени вычисляются силы, действующие на ракету: по равнодействующей всех сил — ускорение, а по ускорению — увеличение скорости за определенный отрезок времени. При этом приходится иметь дело, во-первых, с тягой двигателя, во-вторых, с силой сопротивления воздуха и, наконец, с силой тяжести, действующей на ракету. Между этими силами, образно говоря, идет борьба: тяга двигателя влечет ракету вперед, сопротивление воздуха препятствует ее движению, а сила тяжести тянет ракету вниз. В полете значения этих сил изменяются. Меняется и направление их действия.

Расчет свободного полета ракеты в космическом пространстве производится по законам небесной механики, как движение любого небесного тела.

Расчет траектории ракеты — задача чрезвычайно сложная и трудоемкая. А так как обычно выбирают наиболее выгодный вариант полета, то приходится производить расчеты многих траекторий. На помощь ученым пришли электронно-вычислительные машины.

До свидания, Земля!

...До старта остается несколько минут. По первой стартовой команде — «ключ на старт» — включаются все цепи, обеспечивающие одновременный запуск двигательных установок с центрального пульта и автоматическое управление, чтобы время старта соответствовало расчетному с точностью до сотых долей секунды.

Одна за другой проходят стартовые команды: «протяжка», «ключ на дренаж», «земля — борт». По команде *«протяжка»* контролируется состояние всех систем ракеты-носителя. Для этого протягиваются ленты телеметрической записи. Многоканальная телеметрическая информация, регистрируемая на лентах, позволяет оценить параметры всех систем и агрегатов ракетно-космического комплекса непосредственно перед стартом. По команде *«ключ на дренаж»* закрываются все дренажные клапаны, прекращается подпитка топливных баков.

Непосредственно перед стартом отводятся фермы обслуживания. По команде *«земля — борт»* отсоединяются штепсельные разъемы кабелей, соединяющие ракету-носитель с наземными коммуникациями (она переводится на автономное управление и бортовое питание), отводится заправочная кабель-мачта.

Открывается главный клапан горючего, а затем клапан окислителя на предварительную ступень.

...В шлемофонах космонавты слышат команду *«зажигание»*. Значит, в камеры сгорания поступили

горючее и окислитель. Сейчас сработает пирозажигающее устройство и создаст в камерах сгорания факел пламени.

Из-под ракеты вырывается ослепительное пламя. Раздается грохот. Но ракета еще неподвижна. В кабину не проникает ни ослепительный отблеск пламени, ни грохот включившихся двигателей. Слышен лишь небольшой шум, и ощущается вибрация.

Двигатели ракеты выходят сначала на промежуточный, а затем на расчетный режим тяги. Вот они набрали полную мощность, давление в камерах сгорания достигло рабочего, тяга двигателей превысила силу тяжести, действующую на ракету-носитель, и она медленно поднимается над стартовым столом, освобождаясь от захватов поддерживающих ферм. Ракета начинает стремительный разгон.

Автоматические и пилотируемые аппараты запускаются на орбиты искусственных спутников Земли и к другим небесным телам при помощи ракет-носителей. В Советском Союзе создано несколько типов таких ракет: ракета-носитель «Космос» выводит на околоземные орбиты спутники; благодаря ракете-носителю «Восток» стал возможен полет человека; ракета-носитель «Протон» обеспечивает запуск тяжелых спутников.

А задумывались ли вы над тем, почему их делают многоступенчатыми?

Одноступенчатая ракета, даже самая лучшая, с самым совершенным двигателем, не в состоянии вывести на орбиту даже маленький спутник Земли. Заданная скорость в этом случае сообщается не только полезному грузу, но и целиком всей конструкции ракеты, что вызывает необходимые большие «накладные» затраты энергии. Причем эти затраты настолько велики, что, как мы видели, космические скорости при помощи одноступенчатых ракет на обычном химическом топливе вообще не могут быть получены. В гравитационном поле Земли даже без учета сопротивления воздуха ракета сможет достичь скорости всего около 4570 м/с. Как же быть? Увеличить скорость можно, соединяя последовательно две или несколько ракет, т. е. образуя многоступенчатую ракету.

Почему же все-таки нельзя создать одну большую одноступенчатую ракету? А дело в том, что отношение масс топлива к массе конструкции ракеты устанавливает определенный предел. Помните, мы говорили, что хороша та ракета, у которой наибольшую массу занимает топливо. Но масса топлива при заданной конструктивной массе имеет определенное конечное значение. Если увеличить массу топлива, конструкция ракеты станет тяжелее. А чтобы сообщить ускорение этой дополнительной массе конструкции — нужно топливо. Словом, достигнув определенного соотношения масс топлива и конструкции ракеты, мы окажемся в заколдованном круге. А выход один — как можно быстрее отделять от ракеты те массы, которые уже не нужны для продолжения ее движения (отработавшие двигатели, пустые баки). Этого можно достичь в схеме многоступенчатой ракеты, где каждая ступень представляет собой самостоятельный блок с двигателем и баками для топлива. Когда все топливо в ступени сгорает, она отделяется от ракеты, и, таким образом, масса, которой двигатель следующей ступени должен сообщить ускорение, становится значительно меньше.

Но не следует думать, что число ступеней ракеты можно увеличивать неограниченно. Расчеты показывают, что если максимальная скорость, которую можно достичь с помощью многоступенчатой ракеты, возрастает в арифметической прогрессии, то полная масса ракеты возрастает в геометрической прогрессии. Стремясь получить все большую скорость ракеты, мы очень скоро убедимся, что достигается это слишком дорогой ценой.

От перегрузки к невесомости

...Однако вернемся к полету, тем более что сейчас самый ответственный момент — *выведение корабля на орбиту*. Космонавты докладывают на Землю о работе систем, о своем самочувствии.

— Я — «Сокол-1», — сообщает командир экипажа. — Полет нормальный. Самочувствие отличное. Плавно растет перегрузка.

Космонавты чувствуют, как наливается свинцом тело, плотнее вдавливаясь в кресло. Стало трудно поднять руку. Вот прибор, показывающий размер перегрузки. В его окошечке цифра «2,5». Это значит, вес тела стал в 2,5 раза больше.

Исследованиями и экспериментами установлено, что здоровый, тренированный и выносливый человек удовлетворительно переносит 6—7-кратное превышение своего веса в течение 5 мин, 10-кратное — 2 мин, 12-кратное — нескольких десятков секунд. И это только в положении тела, когда перегрузка действует в направлении «грудь — спина» — так в космическом корабле устанавливаются кресла.

При выведении корабля на орбиту перегрузки определяются режимом работы и числом ступеней ракеты-носителя, которая сообщает кораблю космическую скорость. При спуске же корабля перегрузки

вызываются торможением спускаемого аппарата в плотных слоях атмосферы.

А что случится, если перегрузки превысят те, о которых мы говорили выше? Человек потеряет сознание в результате отлива крови от головы. С нетренированным человеком это может произойти, когда перегрузка достигнет всего пяти единиц.

...Перегрузка растет. Но вот, достигнув максимума, она внезапно ослабевает. Уменьшились шум, вибрация. Произошло отделение первой ступени — тяга снизилась. Через несколько секунд перегрузка снова возрастает.

Уменьшение и увеличение перегрузки происходят и после отделения второй ступени — это время выключения двигателей одной ступени и выхода на расчетный режим тяги другой.

Наконец наступает полная тишина. Отработала третья ступень ракеты-носителя. Вскоре и она отделяется от корабля.

Корабль на орбите!

По команде программно-временного устройства раскрываются панели солнечных батарей, антенны бортовых радиотехнических средств.

Но что это? Корабль медленно вращается. В иллюминаторах попеременно показываются Земля, Солнце. Здесь нет ничего необычного: произошло это из-за *возмущений* при отделении от последней ступени. Сейчас включится одна из основных систем корабля — *система ориентации и управления движением*, и вращение прекратится.

Состояние невесомости наступает сразу же, как только корабль достигает орбитальной скорости и прекращается работа двигательной установки последней ступени ракеты-носителя.

Невесомость — наиболее характерный фактор космического полета. С шумом, вибрацией, ограниченным объемом жизненного пространства, искусственной атмосферой человек в той или иной мере встречается в земных условиях (во время плавания на подводных лодках, в полетах на самолетах). Невесомость же присуща только космическому полету.

Еще недавно фантасты писали о невесомости как об удивительно приятном состоянии, чувстве пьянящей легкости. В действительности все оказалось сложнее.

Организм человека в течение миллионов лет формировался под воздействием силы тяжести. Под ее воздействием человек после рождения вырабатывает координацию движений. Работа органов нашего тела также связана с действием силы тяжести. А то, что сила эта не маленькая, каждый, очевидно, убеждался, свалившись с дерева или с крыши. Поэтому человек, отправляющийся в космос, сознательно подвергает себя испытанию невесомостью, которая действует на людей по-разному. Космическая медицина установила, что есть три группы людей, резко различающихся поведением в условиях невесомости.

Люди первой группы вообще не переносят невесомости. Они испытывают непроходящее чувство падения. Их поведение напоминает поведение испуганного человека. Ни о каких разумных, осознанных действиях такого человека не может быть и речи. Путь в космос таким людям заказан.

Люди второй группы испытывают всевозможные неудобства, или, как говорят, дискомфорт. Например, им кажется, что они находятся в перевернутом положении, что они опрокидываются на спину. Невесомость отвлекает их внимание, снижает работоспособность. Если степень снижения работоспособности не очень велика, такие люди могут быть космонавтами.

Людям третьей группы невесомость не доставляет заметных неприятностей. Они быстро приспосабливаются и даже испытывают радость, возбуждение, подъем. Люди, которым чувство невесомости более или менее знакомо,— летчики-истребители.

Можно ли повысить устойчивость организма к невесомости? Можно. Для этого разработаны специальные тренажеры. У нас, в Центре подготовки, такую тренировку проходят будущие космонавты.

Что же происходит в корабле при невесомости?

Все, что не было закреплено, вдруг оказывается плавающим по кабине. Бортжурнал, немало весивший на Земле, застыл в воздухе. Стоит его слегка толкнуть, как он уплывает в сторону.

Едва освободившись от привязных ремней, мы сразу же оказываемся у потолка. Свои движения приходится соизмерять, так как с какой силой оттолкнешься от кресла, с такой и «приложишься» к потолку, с какой силой оттолкнешь от себя предмет, с такой он врежется в стенку кабины.

Можно открыть крышку люка, ведущего в орбитальный отсек, убедившись предварительно, что там такое же давление, как в кабине. В орбитальном отсеке находится научная аппаратура, приборы. На первом витке инженер-исследователь обычно занят тем, что достает их и укрепляет на рабочих местах. Делать это нетрудно: тяжелые на Земле, теперь они легче пушинки.

Помню, от кинокамеры, с которой мы ходили по Звездному в поисках объекта для съемки во время подготовки к полету, очень быстро уставали руки — как-никак в ней больше трех килограммов. Зато здесь с ней можно делать что угодно.

Для удобства передвижения к полу отсека прикреплены петли, а вдоль стен укреплен поручень.

Выведение на орбиту и возвращение на Землю космического корабля «Союз»: *1* — старт; *2* — отделение блоков первой ступени; *3* — отделение двигателя системы спасения космонавтов и сброс головного обтекателя; *4* — отделение второй ступени; *5* — выход корабля на орбиту и отделение третьей ступени; *6* — раскрытие панелей солнечных батарей и антенн; *7* — ориентированный полет; *8* — включение тормозной двигательной установки; *9* — разделение отсеков корабля; *10* — управляемый спуск в атмосфере;

11 — отделение крышки люка и ввод в поток тормозного парашюта; *12* — отделение тормозного парашюта и ввод в поток основного купола; *13* — отделение теплозащитного экрана; *14* — включение двигателей мягкой посадки.

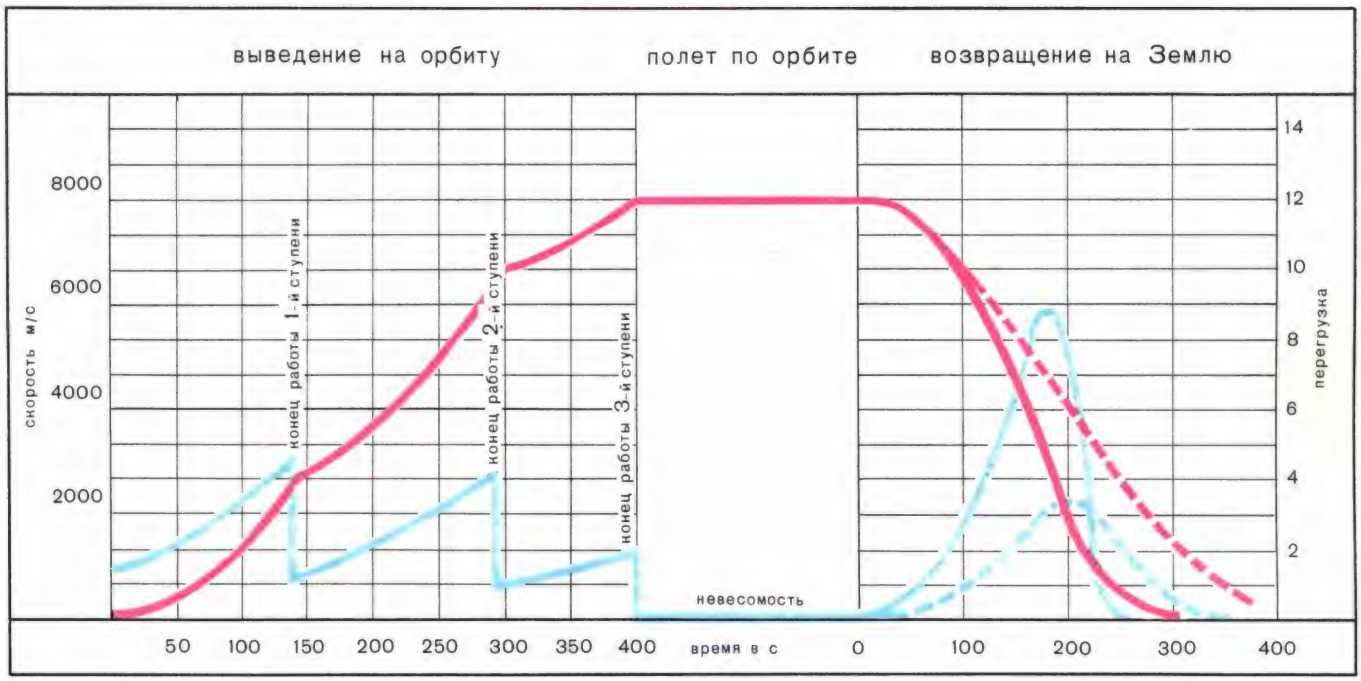


График скорости и перегрузки при выведении, полете по орбите и возвращении на Землю корабля-спутника.

Фиксация тела в невесомости превратилась в серьезную проблему. К примеру, вам надо сфотографировать через иллюминатор горизонт Земли. Аппарат установлен на специальном кронштейне. А чтобы горизонт попал в кадр, надо заглянуть в видоискатель. Попробуйте-ка сделать это, не зафиксировав положения своего тела!

Не очень-то удобно и спать, плавая по всему отсеку.

В корабле еще до полета поддерживают чистоту, как в хирургической палате. Пылесосами из него убирают все до последней соринки, иначе весь мусор плавал бы по кабине. Вдруг какая-нибудь крупинка попадет в дыхательное горло! Пищу готовят в таком виде, чтобы она не крошилась. А чтобы удобно было ее употреблять, помещают в тубы разных размеров. Много хлопот доставляет вода. Пить ее приходится через мундштук с краником. Разливаясь, она приобретает форму шариков различных размеров и летает по отсеку, подобно мыльным пузырям. Попробуйте их потом собрать!

В невесомости нарушается привычная координация движений. Вот вы протягиваете руку, собираясь нажать кнопку на пульте управления, а палец попадает выше кнопки. Все движения, которые в земных условиях мы делаем как бы автоматически, здесь первое время приходится тщательно контролировать.

Новая координация движений в невесомости вырабатывается довольно быстро — в течение нескольких часов. Но влияние невесомости на этом не кончается. При длительных полетах мышцы, скелет, все органы тела человека, лишенные привычной нагрузки, претерпевают изменения. Чтобы длительное пребывание в невесомости не вызывало серьезных нарушений в организме, человеку приходится выполнять в полете физические упражнения. Были созданы специальные снаряды: эспандеры, тренировочно-нагрузочный костюм, бегущая дорожка и др. И все-таки, вернувшись из полета, космонавты вынуждены долго привыкать к земной тяжести. Первые дни они как бы испытывают перегрузку: трудно ходить, жестко лежать. Они быстро утомляются.

Ученые считают, что на космических кораблях, отправляющихся в дальний космос, и на долговременных орбитальных станциях нужно создать *искус-*

В открытом космосе.

ственную силу тяжести, равную хотя бы 0,3 земной. Но это чрезвычайно сложно. Поэтому специалисты космической медицины ищут другие пути повышения устойчивости человеческого организма к длительной невесомости.

Впервые в открытом космосе

Конечно, невесомость создает неудобства в корабле. Но их появляется еще больше, когда космонавты выходят в открытый космос, чтобы заменить неисправные антенны и датчики, проверить состояние обшивки и агрегатов, установленных на внешней поверхности корабля, выполнить монтаж крупногабаритных устройств. Да мало ли для чего понадобится космонавтам выходить за борт своих кораблей и орбитальных станций! Для космонавта это все равно что моряку уметь плавать.

Послушаем рассказ человека, который первым вышел в открытый космос,— Алексея Архиповича Леонова.

«Экипажу «Восхода-2» нужно было испытать шлюз для выхода в космос, новый скафандр, систему жизнеобеспечения, определить способность человека жить и работать в условиях открытого космического пространства. Мне предстояло выйти из корабля, выполнить ряд операций, установить, а затем демонтировать кинокамеры, после чего войти в корабль.

В результате многочисленных тренировок я не только мог на память в нужном темпе выполнить все операции, но и знал, в какой момент какой район поверхности Земли подо мной окажется.

Казалось, что ничего непредвиденного произойти не может. И тем не менее я удивился, когда, выйдя из корабля и держась за поручень, установленный на срезе шлюза, почувствовал, как корабль начал медленно поворачиваться. Сравнить это можно с состоянием, когда пловец пытается влезть в лодку, а она под его тяжестью накреняется. А до моего выхода «Восход-2» был сориентирован, как и предусматривалось: внизу Земля, вверху Солнце. Мой выход должен был сниматься на фоне Земли. Солнце должно было меня освещать, а не лезть в объективы аппаратов. Словом, все предусматривалось, как в павильоне Мосфильма. Но космос стал диктовать свои условия. Пришлось быстро вводить поправки в свой сценарный план.

До полета мы предполагали, что передвижение вне корабля как-то скажется на его ориентации, но не думали, что в такой степени. Казалось, разница в массе человека и корабля огромная (в скафандре моя масса около 100 кг, а масса корабля около 6 т), и если не делать резких движений, толчков, то казалось, все будет нормально. И тем не менее...

Я вышел над Черным морем. Высота равнялась примерно 450 км. Поэтому в поле зрения находилось все море — от Одессы до Батуми, от Ялты до Синопа. Были видны весь Крымский полуостров, часть Кавказа. Впечатление было такое, словно я лечу над знакомой с детства большой географической картой...»

Практически возможны два основных способа выхода человека в открытое космическое пространство: с помощью шлюзования и разгерметизации кабины корабля. *Шлюзование* — более сложный способ, но зато менее опасный, а выход с *разгерметизацией кабины* менее сложен, но зато в этом случае в вакууме оказывается весь экипаж и все оборудование. Наибольшее распространение получил первый способ.

В кораблях типа «Союз» роль шлюза стал выполнять орбитальный отсек, оснащенный соответствующим оборудованием. В январе 1969 г. советские космонавты Алексей Станиславович Елисеев и Евгений Васильевич Хрунов перешли через открытое космическое пространство из корабля в корабль, выполнив по пути ряд научных экспериментов.

Выход человека в открытый космос имел огромное значение. Он открыл путь большому направлению в разработке космических аппаратов и в космических исследованиях.

Не следует думать, что работать за бортом корабля легко. Как только человек выходит в открытый космос, сразу возникает несколько проблем: как и с помощью чего передвигаться, как и с помощью чего фиксировать свое тело в нужном положении для работы. Здесь нужен специальный безынерционный рабочий инструмент: ключи, отвертки, сверла, молотки. Нужна специальная технология монтажных и ремонтных работ.

Советские космонавты первыми проверили на орбите различные виды сварки.

Земля — с орбиты

...С кораблем постоянно поддерживается надежная радиосвязь. Телеметрическая информация о состоянии бортовых систем и агрегатов корабля поступает на наземные измерительные пункты.

После «ухода» корабля с территории Советского Союза связь с ним поддерживается через научно-исследовательские суда Академии наук, находящиеся в различных пунктах Мирового океана.

Ослепительно яркое солнце врывается в иллюминатор. Его свет напоминает свет электросварки. Незащищенными глазами на солнце смотреть нельзя — можно потерять зрение. Поэтому иллюминаторы снабжены специальными фильтрами.

Внизу проплывают белые стайки облаков, в просвете между ними виднеется очертание морского побережья. Примерно 70% поверхности нашей планеты постоянно покрыто облаками. Поэтому из космоса она кажется большим перламутровым шаром.

В кабине быстро темнеет — корабль входит в тень Земли. За бортом корабля загорелись звезды. Точно яркие алмазы на черном бархате, горят, не мигая, далекие светила. Стрелки часов показывают, что близится момент выхода корабля из тени Земли. Прошло немногим более получаса — и снова рассвет. Над Землей у горизонта вспыхивает волшебная радуга.

Все континенты земного шара, все моря имеют свои отличительные цветовые особенности. Преобладающий цвет африканского континента — желтый с вкрапленными темно-зелеными пятнами джунглей, оазисов. Южная Америка — зеленая, Азия — темно-коричневая.

Горы тоже отличаются друг от друга. Кордильеры — темно-серые. Даже с космической высоты угадывается готическая острота их вершин. Памир — красный, покрыт белыми пятнами ледников.

Разные оттенки у морей и океанов. Воды Атлантического океана темнее тихоокеанских просторов. А наше Черное море недаром зовется черным — сверху оно темно-синее (см. стр. 101).

Велика наша планета Земля. Но в иллюминаторах космического корабля ее громадные материки проплывают быстро, как в сказке. Только что корабль находился над Африкой, а теперь внизу уже просторы нашей Родины, с ее квадратами полей, тайгой, широкими реками, темными горными цепями, изрезанными глубокими ущельями. По окраске можно различить еще не сжатые хлеба и поля, уже вспаханные под озимь. У нас осень — уборка урожая, а через полчаса в Южной Америке — весна.

Помню, как после полета Юрий Алексеевич Гагарин красочно описывал Землю, окруженную нежно-голубым ореолом, говорил, как впервые увидел шарообразность нашей планеты. С высоты свыше 200 км уже заметна кривизна горизонта.

Снова корабль входит в тень Земли. Нежно-голубой ореол плавно темнеет, становится бирюзовым, темно-синим, фиолетовым, и, наконец, все вокруг погружается в черный цвет.

Каждые полтора часа корабль совершает оборот вокруг земного шара.

Три космические скорости

Как мы уже говорили, космическому аппарату, чтобы он смог совершить полет, нужно сообщить строго определенную скорость.

Какую скорость должен иметь искусственный спутник Земли? А космический корабль, который отправится к Луне? А с какой скоростью нужно отправить к Венере автоматическую станцию? Ответ на эти вопросы дает астродинамика — наука, изучающая движение искусственных небесных тел (спутников Земли, Луны, автоматических межпланетных станций и др.).

Я убежден, что многие уже слышали о трех космических скоростях и наверняка скажут: «Первая космическая скорость — это та, которая необходима

для запуска искусственного спутника Земли, вторая — для того, чтобы отправиться к планетам, а третья — чтобы улететь за пределы Солнечной системы».

На вопрос: «Чему равны первая и вторая космические скорости?» — в подавляющем большинстве случаев можно услышать ответы: «7,9 и 11,2 км/с». Однако такие ответы будут не совсем точными. Спутники и космические корабли летают с несколько меньшими скоростями. Например, корабли типа «Восток» летали со средней скоростью 7,7 км/с.

В чем же дело? Оказывается, 7,9 и 11,2 км/с (более точно 11,19) — это космические скорости, приведенные к поверхности Земли. А космические аппараты получают нужные скорости в нескольких сотнях километров от ее поверхности, где отсутствует атмосфера. Там сила притяжения Земли меньше. Чем дальше от поверхности планеты проходит орбита корабля, тем меньшая скорость ему нужна для того, чтобы вырваться из плена земного тяготения. *Первую космическую скорость* называют еще *круговой скоростью*. Ею должен обладать аппарат, чтобы стать искусственным спутником планеты и двигаться вокруг нее по круговой орбите. Но поскольку на формирование такой орбиты решающее влияние оказывает сила притяжения планеты, то для разных планет круговая скорость на одной и той же высоте будет различной, потому что у планет различная сила притяжения. На высоте 200 км спутник Земли должен иметь круговую скорость 7,791 км/с, на такой же высоте спутник Венеры должен обращаться со скоростью 7,201 км/с, спутник Марса — 3,461 км/с, а у спутника Луны эта скорость всего 1,590 км/с.

Второй космической скоростью называют скорость, с которой аппарат, преодолевая притяжение Земли, улетает в космическое пространство. В этом случае он будет двигаться не по замкнутой орбите вокруг Земли, а устремится по параболической траектории, навсегда удаляясь от нашей планеты. Поэтому такую скорость часто называют *параболической*. Ее отношение к круговой скорости равно числу $\sqrt{2}$, т. е. она примерно на 40% больше круговой скорости. Это справедливо не только для Земли, но и для всех других планет.

Чтобы преодолеть притяжение Солнца, аппарату надо сообщить скорость 16,7 км/с. Это *третья космическая скорость*. С ней аппарат станет удаляться от Земли по гиперболе.

Рассказ о космических скоростях мы закончим ответом на вопрос: «Изменяются ли в полете скорости космических аппаратов, и если да, то как именно?»

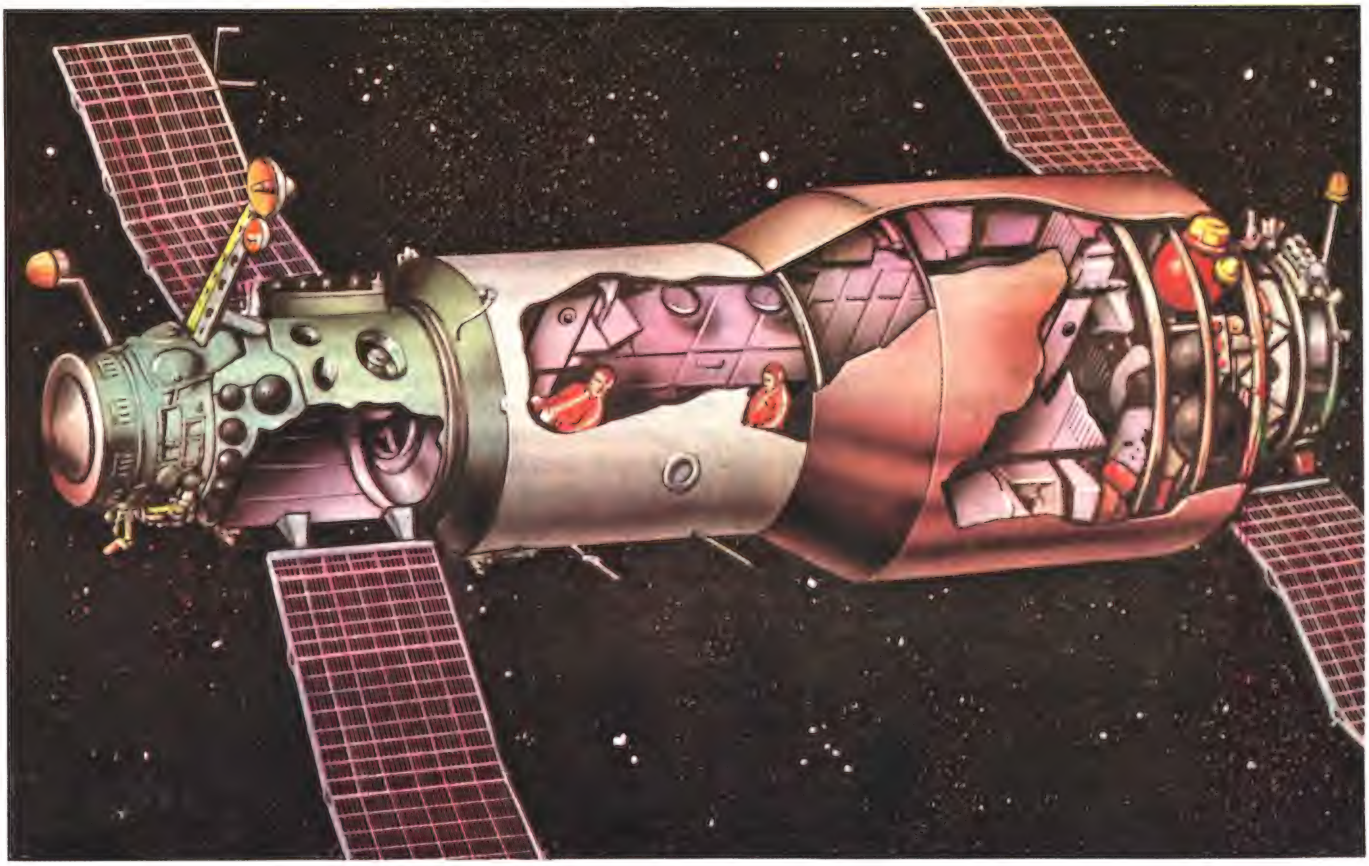
В сообщениях ТАСС о запусках спутников и космических кораблей встречаются термины «апогей» и «перигей». Апогей и перигей — две самые характерные точки эллиптической орбиты, которая возникает, когда космическому аппарату сообщается скорость, отличная от круговой. *Апогей* — это точка орбиты, находящаяся на максимальном расстоянии от центра Земли, а *перигей* — на минимальном. Однако в сообщениях о запусках космических аппаратов указывается не все это расстояние, а лишь удаление их от поверхности Земли, т. е. из полученного результата вычитают средний радиус Земли, равный 6371 км.

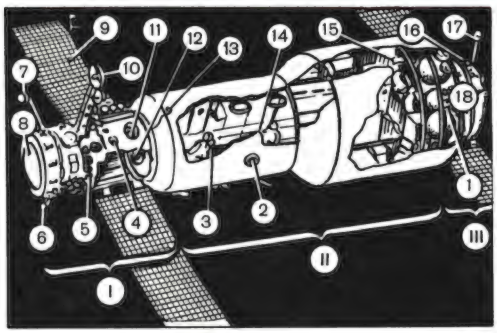
При полете по эллиптической орбите скорость аппарата будет непрерывно изменяться. Максимальную скорость он будет иметь в перигее. Здесь на минимальной высоте аппарат имеет наименьший запас потенциальной энергии. Зато кинетическая энергия, определяемая его скоростью, имеет в этой точке максимум. Пройдя перигей, аппарат, двигаясь по эллиптической орбите, набирает высоту. Потенциальная энергия его возрастает за счет уменьшения энергии кинетической. Поэтому по мере увеличения высоты полета скорость аппарата убывает. Вот какие скорости будут у аппарата, обращающегося на эллиптической орбите с апогеем 10 000 км и перигеем 200 км: в апогее 3,738 км/с и в перигее 9,306 км/с.

Термины «апогей» и «перигей» применимы только к орбитам искусственных спутников Земли. Аналогичные точки эллиптической орбиты спутника Луны называются *апоселений* и *периселений*, спутника Солнца — *афелий* и *перигелий*.

Поскольку речь зашла об элементах орбиты искусственных спутников, к названным следует добавить период обращения и наклонение орбиты. *Период обращения* — это промежуток времени, в течение которого спутник совершает полный оборот вокруг небесного тела — Земли, Луны, Марса, Солнца и т. д. Наклонение орбиты искусственного спутника Земли представляет собой угол между плоскостью, мысленно проведенной через земной экватор, и плоскостью, в которой движется спутник. Это единственный параметр орбиты, значение которого остается практически постоянным на протяжении всего существования спутника, в то время как другие параметры могут изменяться.

Изменение плоскости орбиты (на несколько градусов и более) возможно, но для этого необходимо вмешательство в пассивный полет космического аппарата, например включение реактивных двигателей при определенной ориентации аппарата. Однако нужно иметь в виду, что для изменения плоскости орбиты даже на несколько градусов нужна колоссальная





Орбитальная станция «Салют»:
I — переходный отсек;
II — рабочий отсек;
III — агрегатный отсек;
1 — системы агрегатного отсека;
2 — иллюминаторы рабочего отсека;
3 — кресло космонавта у пульта управления станцией;
4 — иллюминаторы переходного отсека;
5 — баллоны с запасами сжатых газов; *6* — датчик ориентации; *7* — антенна обзора системы поиска; *8* — приемный конус стыковочного устройства; *9* — панели солнечных батарей;
10 — антенна системы наведения; *11* — астрономическая система «Орион»; *12* — люк-лаз между переходным и рабочим отсеками;
13 — световые индексы;
14 — научное оборудование рабочего отсека;
15 — бытовое оборудование;
16 — микродвигатели системы ориентации;
17 — антенна обзора системы поиска;
18 — телевизионная камера внешнего обзора.

энергия, сравнимая подчас с той, что была затрачена на выведение аппарата на орбиту.

Для запуска корабля или автоматической станции к планетам надо при старте сообщить им такое количество энергии, чтобы они не только преодолели силу земного притяжения, но и сохранили при этом необходимую скорость. Для этого они должны приобрести при отлете с Земли скорость, которая значительно больше второй космической. Например, чтобы достичь орбиты Венеры, скорость отлета с Земли должна быть 11,462 км/с, а чтобы достичь орбиты Марса, скорость отлета должна быть 11,570 км/с.

Все автоматические межпланетные станции сначала выводятся на орбиту искусственных спутников Земли и уже затем стартуют к Венере и Марсу. В этом случае им достаточно сообщить для отлета к планете дополнительную скорость лишь 3—4 км/с, что можно сделать с помощью всего одной ступени ракеты.

Не случайно так много внимания мы уделили рассмотрению космических скоростей. Быстроту передвижения человек ценил всегда. Однако скорость никогда прежде не была необходимым условием путешествия. Несколько лет добирался до Индии Афанасий Никитин. Много месяцев понадобилось Магеллану для кругосветного путешествия. Более двух суток находились в воздухе экипажи Чкалова и Громова, совершавшие перелеты из Москвы через Се-

верный полюс в Америку. Сейчас эти путешествия люди совершают быстрее, удобнее и проще. Но ни одного путешествия к небесным телам не смог совершить человек, пока не научился сообщать своим аппаратам строго определенные космические скорости.

Ориентация корабля

Наиболее часто выполняемая в полете операция — это *ориентация корабля в пространстве*, которая необходима для коррекции орбиты, стыковки с другими кораблями и орбитальными станциями, для проведения многих научных и технических экспериментов, для спуска с орбиты. Большую часть времени в полете корабль медленно вращается вокруг своих осей. Но в таком случае его солнечные батареи будут лишь время от времени освещаться Солнцем и не дадут нужной электроэнергии. Тут нужна одноосная ориентация корабля на Солнце. Для связи с Землей при полетах к Луне и планетам антенны корабля должны быть ориентированы на Землю.

Пространственная ориентация корабля осуществляется с помощью инерциальных, ионных, инфракрасных, радиотехнических, оптических и других систем. Однако наибольшую точность обеспечивают астрономические системы. Такая ориентация называется *астроориентацией* и выполняется автоматически.

Расположение небесных объектов — Солнца, Луны, планет, звезд относительно друг друга в каждый момент точно известно, и если мы под нужными углами придадим осям корабля направление на небесные объекты, то получим требуемое положение корабля в пространстве.

Вот как проводится астроориентация корабля по Солнцу и звезде. Сначала в программно-временное устройство по командам с Земли вводятся необходимые данные, содержащие значения углов. Один из оптических датчиков устанавливается в такое положение, чтобы угол между осью этого датчика и осью датчика Солнца соответствовал взаимному расположению Солнца и звезды в данный момент.

Ориентация начинается с поиска Солнца. Двигатели малой тяги разворачивают корабль вокруг продольной оси до тех пор, пока Солнце не попадет в поле зрения датчика Солнца. Если в этом положении удержать корабль, то он окажется сориентированным лишь в одной плоскости, например Земля будет внизу. Но двигательная установка корабля при его движении по орбите может быть направлена в разные стороны. Чтобы этого не произошло, другие двигатели малой тяги разворачивают корабль вокруг оси, направленной на Солнце, до тех пор, пока звездный датчик не «захватит» нужную звезду. В этом положении корабль стабилизируется и далее удерживается двигателями ориентации по командам от гироскопических приборов, волчки которых раскручиваются во время стабилизации.

Почему звездный датчик не путает звезды, ведь их так много? Действительно, в каждый момент под одним и тем же углом от Солнца со всех его сторон могут оказаться десятки звезд. Тем не менее датчик «захватывает» только нужную звезду. Не ошибается он потому, что для ориентации берутся не любые, а лишь самые яркие звезды. Датчик же «загрублен», и поэтому остальные звезды он не «захватывает».

Коррекция орбиты

На высоте около 200 км над поверхностью Земли, где чаще всего проходят орбиты космических кораблей, плотность атмосферы сравнительно невелика. Но все-таки она оказывает определенное тормозящее воздействие на корабль таких размеров, как «Союз». Если полет продолжается несколько недель, то высота орбиты будет постепенно снижаться, а тормозящее влияние атмосферы возрастать. Если не принять меры, корабль войдет в плотные слои атмосферы, потеряет орбитальную скорость и совершит вынужденную посадку. Чтобы продлить полет, с помощью коррекции увеличивают высоту полета корабля.

Но коррекция орбиты проводится и для того, чтобы обеспечить прохождение космического корабля над заданным районом в определенное время. Если мы увеличим высоту полета, возрастет период обращения корабля вокруг Земли. При выдаче тормозного импульса корабль перейдет на более низкую орбиту, и период обращения уменьшится. Проведя соответствующую коррекцию, можно обеспечить прохождение своего корабля над местом старта другого корабля и наблюдать из космоса за его выведением на орбиту.

Коррекция орбиты может проводиться вручную или автоматически — с использованием астроориентации.

Как выполняется коррекция орбиты с использованием ручной ориентации? Обычно необходимые данные для коррекции поступают с Земли и фиксируются в бортовом запоминающем устройстве. Однако разгонный или тормозной импульс, а также время включения двигательной установки может рассчитать и ввести в запоминающее устройство экипаж корабля. Для этого существует специальный пульт.

Предположим, что данные для коррекции рассчитаны и введены в запоминающее устройство. Бортинженер включает клавишу. Засветились надписи «Маневр с ручной ориентацией», «Визир для ориентации». Командир корабля берется за ручки управления. Медленно движется по экрану визира Земля. Оперируя ручками управления, космонавт включает реактивные микродвигатели и поворачивает корабль до совмещения центральной части экрана с направлением на центр Земли. Вот перекрестие экрана совпало с этим направлением. Корабль сориентирован. Нужно нажать другую кнопку, и вспыхнет транспарант «Ориентация на гироскопах». Это значит, что волчки гироскопов начали стремительное вращение, а их оси заняли в пространстве независимое от корпуса корабля положение. Они «запомнили» ориентацию. Теперь при любых отклонениях корабля автоматически выдаются команды на двигатели, которые возвращают его в исходное положение.

Но произошла пока только одноосная ориентация корабля. Теперь надо развернуть его так, чтобы основная двигательная установка была направлена вперед по движению, если предстоит выдать тормозной импульс, и назад, если требуется выдать разгонный импульс. Все последующие операции выполняются автоматически. Из запоминающего устройства поступает сигнал на разворот корабля в горизонтальной плоскости. Вот корабль занял нужное положение в пространстве. Автоматически выдается команда на включение двигательной установки.

Сила инерции прижимает или выталкивает космонавтов из кресла (определите сами, в каком случае прижимает, а в каком выталкивает). На индикаторе «скачут» цифры, показывающие величину отработанного импульса скорости. Вот их бег остановился — двигатель выключился. Остается доложить на пункт управления полетом, что коррекция прошла нормально, корабль был сориентирован правильно, а двигатель включен в расчетное время. Теперь координационно-вычислительный центр по данным траекторных измерений определит новую орбиту корабля и сообщит ее параметры экипажу.

А при желании вы можете сделать это сами. Подумайте над тем, как с космического корабля рассчитать параметры орбиты.

Закрутка на Солнце

Электрическим током бортовая аппаратура и оборудование корабля снабжаются от аккумуляторов, которые время от времени подзаряжаются от солнечных батарей.

Вот как это делается.

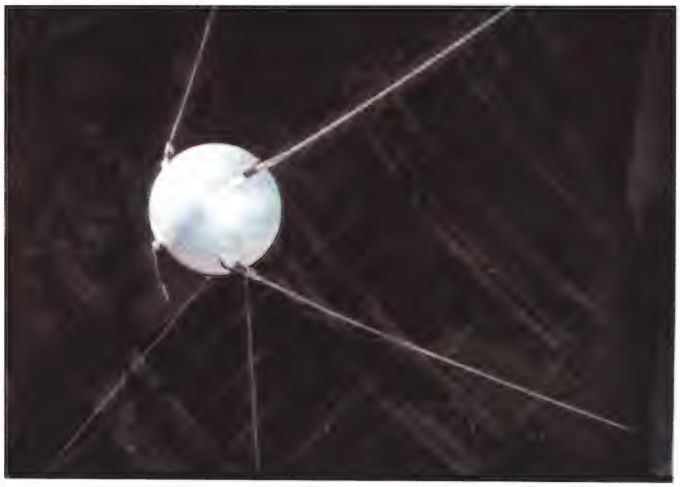
На пульте есть клавиша с надписью «Закрутка». (Значение этого слова станет понятным из последующего рассказа.) После нажатия на клавишу включаются двигатели малой тяги, обеспечивая вращение корабля вокруг одной из осей. На экране, сменяя друг друга, проплывают изображения Земли, Луны, звезд. Как только появляется изображение Солнца, космонавт делает небольшое движение правой ручкой управления (помните, для чего она предназначена?), и Солнце начинает описывать круг в поле зрения визира. Еще одно движение — и перекрестие совпадает с изображением Солнца. В этом положении корабль сориентирован так, что ось корабль — Солнце перпендикулярна поверхности панелей солнечных батарей. А это значит, что на них теперь падает максимальный световой поток и вырабатывается наибольшей силы электрический ток. Электроэнергия, собираемая с поверхности солнечных батарей, подзаряжает аккумуляторы корабля.

Чтобы долго удерживать корабль в таком положении, пришлось бы все время расходовать топливо в двигателях системы ориентации, а космонавту следить, чтобы Солнце находилось в центре визира-ориентатора. Однако этого можно избежать, если придать кораблю вращение вокруг оси корабль — Солнце со скоростью несколько градусов в секунду. В результате гироскопического эффекта ориентация солнечных батарей на Солнце будет сохраняться.

Стыковка кораблей

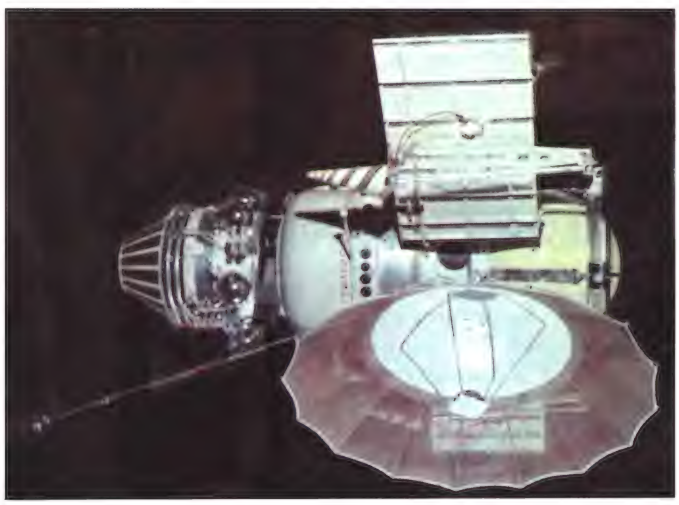
...Одна из самых сложных операций, выполняемых в полете космическими кораблями,— стыковка их между собой и с беспилотными аппаратами. Она выполняется и автоматически, и с участием экипажей. Целью стыковки может быть монтаж крупных орбитальных станций, межпланетных кораблей из отдельных блоков, последовательно выводимых на околоземную орбиту. Стыковка необходима также для

Первый искусственный спутник Земли.



«Луна-16».

«Венера-4».



оказания помощи или спасения экипажа корабля, терпящего бедствие. Предложена она К. Э. Циолковским.

Послушаем рассказ командира «Союза-4» Владимира Александровича Шаталова о том, как выполняется стыковка. Его корабль стартовал 14 января 1969 г. А на следующий день он должен был состыковать его с кораблем «Союз-5», которым командовал Борис Валентинович Волынов, и принять на свой борт двух космонавтов — Алексея Станиславовича Елисеева и Евгения Васильевича Хрунова.

«На второй день полета, пролетая в районе Байконура, я наблюдал по инверсионному следу выведение корабля «Союз-5».

После успешного выведения его на орбиту начался этап сближения и стыковки кораблей. «Союз-4» и «Союз-5» выполнили ряд маневров с ручным управлением, которые обеспечили их дальнейшее сближение с расстояния более 1000 км. На удалении в несколько километров вступила в работу автоматическая система сближения. По командам этой системы на корабле «Союз-4» несколько раз включалась сближающе-корректирующая двигательная установка. При этом было обеспечено постепенное сближение кораблей с переменной, в зависимости от расстояния, скоростью. Автоматическое сближение контролировалось мною по приборам и визуально через оптический визир и телевизионную установку. Во время сближения космический корабль «Союз-4» ориентировался стыковочным узлом в направлении корабля «Союз-5».

С расстояния 100 м я и Борис Волынов перешли на ручное управление кораблями. Управляя кораблями, мы поддерживали необходимую их взаимную ориентацию. Скорость сближения кораблей я изменял в зависимости от расстояния между ними.

У берегов Африки, на удалении 7000—8000 км от границ Советского Союза, мы подошли друг к другу на расстояние около 40 м и выполнили зависание. На этом расстоянии мы с Борисом Волыновым провели несколько маневрирований, при которых изменяли взаимное положение кораблей, фотографируя при этом друг друга. Далее продолжали сближение и в зоне прямой телевизионной связи с Землей осуществили стыковку. Этот процесс можно было видеть на экранах телевизоров.

Во избежание грубого соударения относительная скорость к моменту касания была доведена до нескольких десятков сантиметров в секунду.

С этой скоростью и произошло причаливание корабля «Союз-4» к кораблю «Союз-5». При причаливании штанга стыковочного механизма корабля «Союз-4» вошла в гнездо приемного конуса корабля

«Союз-5» и произошел взаимный механический захват. Далее было осуществлено жесткое стягивание кораблей и соединение их электрических разъемов».

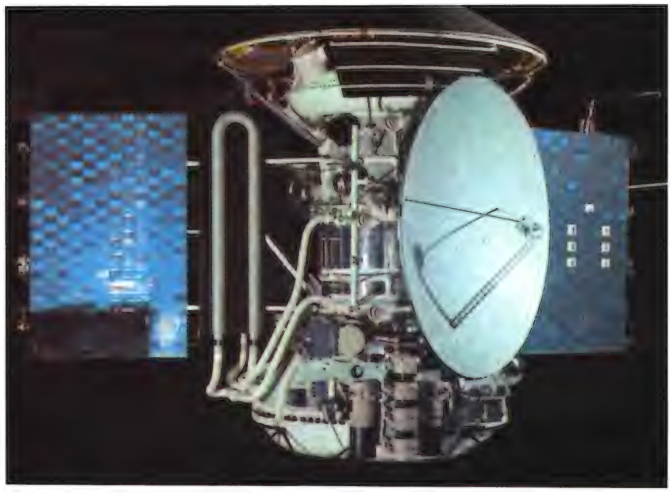
Что я могу добавить к рассказу Шаталова? Пожалуй, немного: напомню, что корабли в это время неслись над Землей с первой космической скоростью, делая один оборот вокруг Земли за 90 мин, и что сблизиться кораблям надо было со скоростью не больше чем 30 см/с. Насколько это сложно, думаю, понимает каждый.

Советский Союз — космическая держава

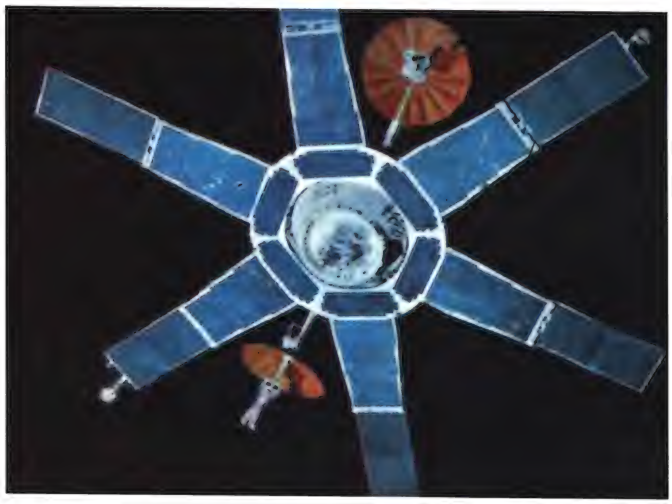
Космические исследования в Советском Союзе ведутся по нескольким важным направлениям: исследование околоземного космоса и воздушной оболочки Земли с помощью искусственных спутников и зондирующих ракет; пилотируемые полеты кораблей в околоземном космосе, предусматривающие проведение обширной программы научных исследований и экспериментов; запуски автоматических межпланетных станций к Луне, Венере и Марсу. Наша страна добилась выдающихся достижений в освоении космоса. Советский Союз послал в космос первый искусственный спутник Земли. Первым человеком, отправившимся в звездные дали, стал гражданин нашей страны Юрий Алексеевич Гагарин. Советские ученые первыми создали многоместный корабль «Восход». Алексей Архипович Леонов стал первым человеком, вышедшим в открытый космос. Советские космонавты первыми выполнили ручную стыковку пилотируемых кораблей, перешли через открытое космическое пространство из корабля в корабль.

Если возьмем запуски автоматических аппаратов, то результаты и здесь не менее впечатляющи. Межпланетная станция «Луна-9» впервые в мире осуществила мягкую посадку на Луну и передала на Землю панораму лунной поверхности. «Луна-10» стала первым искусственным спутником Луны. Станцию «Луна-16» назвали лунным геологом за то, что она взяла образцы лунного грунта и принесла их на Землю. Нашим ученым впервые в истории космонавтики удалось доставить на поверхность Луны самоходный аппарат «Луноход-1», управляемый с Земли, который работал на Луне почти год. Наши межпланетные станции первыми достигли далекой Венеры, сообщив ученым ценные сведения о химическом составе, давлении и температуре атмо-

«Марс-3».



«Молния-1».



«Метеор».

Юрий Алексеевич Гагарин и Герман Степанович Титов.

сферы планеты. Впервые в истории космонавтики спускаемый аппарат станции «Марс-3» совершил мягкую посадку на Марс.

В изучении околоземного космического пространства, Луны и других небесных тел Солнечной системы в нашей стране ведущая роль сейчас отводится автоматическим аппаратам. В ближайшие годы они останутся фактически единственным средством непосредственного изучения дальнего космоса и планет. Объясняется это их большими исследовательскими возможностями. Они могут работать там, где человек пока работать не может. Кроме того, автоматические аппараты дешевле пилотируемых.

Однако нашим верным помощникам — автоматам далеко не все по плечу. Поэтому участие человека в исследовании и освоении космического пространства обязательно.

Сейчас советская наука подошла к созданию долговременных орбитальных станций и лабораторий — решающего средства широкого освоения космического пространства. В околоземном космосе уже прошла всестороннюю проверку первая орбитальная научная станция «Салют». Ее экипаж в составе Георгия Тимофеевича Добровольского, Владислава Николаевича Волкова и Виктора Ивановича Пацаева в течение двадцати трех суток выполнял широкую программу полета. Были испытаны все системы станции, проведены десятки сложнейших научно-технических и медико-биологических исследований и экспериментов.

Занимаясь освоением космоса, мы думаем не только о завтрашнем дне — космос уже сегодня работает для людей. В Советском Союзе несколько лет успешно функционирует система дальней космической радиосвязи и сеть приемных станций «Орбита», которые используют ретрансляционные спутники «Молния-1». Миллионы людей получили возможность смотреть передачи Центрального телевидения, вести радиотелефонные переговоры с самыми отдаленными пунктами страны. Несколько лет мы пользуемся услугами метеорологической космической системы «Метеор», которая регулярно собирает метеоинформацию для службы погоды и научных исследований.

В настоящее время космические исследования проводят многие страны, ибо это сулит выгоды каждой стране, большой или малой, развитой или только развивающейся. У Советского Союза широкие международные связи по исследованию и использованию космического пространства. Успешно развивается сотрудничество с социалистическими странами по программе «Интеркосмос».

Пять стран — СССР, США, Франция, Япония и Китай — запускают в космос исследовательские аппараты с помощью *своих* ракет-носителей.

Большим достижением американской космонавтики является высадка человека на Луну по программе «Аполлон». 20 июля 1969 г. лунная кабина космического корабля «Аполлон-11», в которой находились космонавты Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин, совершила посадку на лунную поверхность в районе Моря Спокойствия. Космонавты, одетые в скафандры с автономной ранцевой системой жизнеобеспечения, собрали образцы лунного грунта и установили на поверхности Луны ряд научных приборов, после чего стартовали к поджидавшему их на лунной орбите в основном блоке корабля Майклу Коллинзу. С тех пор американские космонавты еще несколько раз побывали на Луне.

Возвращение на Землю

Остается заключительный этап полета — *посадка*. Но если посадка самолета кажется сложной, то сход космического корабля с орбиты, спуск его в атмосфере еще сложнее.

Многотонный корабль, движущийся с орбитальной скоростью, обладает огромной кинетической и потенциальной энергией.

Вы помните, какая энергия потребовалась для выведения корабля на орбиту? Эту энергию ему сооб-

Ракета-носитель «Сатурн-5» на старте.

Первые люди на Луне.

щила огромная трехступенчатая ракета-носитель. Казалось бы, для того чтобы осуществить сход с орбиты, нужны столь же мощные двигательные установки. Представляете, какой была бы масса корабля? Но оказывается, полностью можно не гасить орбитальную скорость с помощью тормозных двигателей. Достаточно сообщить кораблю сравнительно небольшой тормозной импульс, чтобы он потерял орбитальную скорость и вошел в плотные слои атмосферы, где и будет происходить основное торможение за счет сопротивления воздуха.

Возвращение корабля на Землю можно разделить на два этапа: первый — сход корабля с орбиты и полет до входа в плотные слои атмосферы, второй — полет в плотных слоях и посадка на Землю. На предпосадочном витке орбиты в программно-временное устройство корабля с Земли поступают команды, содержащие информацию о времени включения двигательной установки и о величине тормозного импульса. Эти данные может рассчитать и экипаж корабля.

На посадочном витке корабль надо сориентировать в пространстве таким образом, чтобы тормозная двигательная установка была направлена вперед по направлению полета — ведь только в этом случае можно уменьшить его скорость. Ориентацию корабля можно выполнять автоматически и вручную. Ручную ориентацию в полете применяли Павел Иванович Беляев («Восход-2»), Владимир Александрович Шаталов («Союз-4») и Борис Валентинович Волынов («Союз-5»).

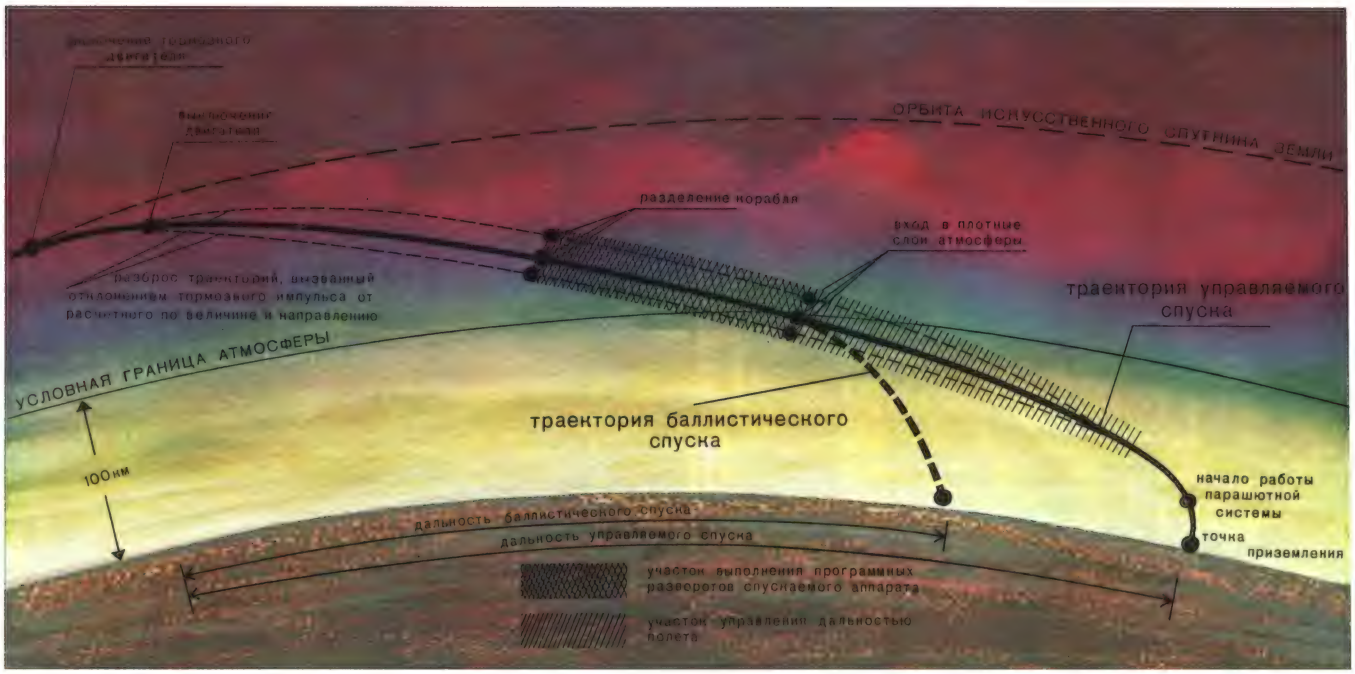
После того как сопло двигательной установки направлено вперед по движению корабля, система ориентации и управления движением удерживает корабль в этом положении. В расчетное время по команде, поступающей из программно-временного устройства, включается двигательная установка. Другая команда, поступающая от измерителя изменения скорости, производит «отсечку» двигателя для того, чтобы спуск проходил по расчетной траектории.

После отработки тормозного импульса скорость корабля уменьшается, происходит разделение отсеков и спускаемый аппарат устремляется к Земле.

Дальнейший полет спускаемого аппарата может быть *управляемым* (с использованием аэродинамического качества) или *неуправляемым* (баллистическим).

Снижение кораблей «Восток» и «Восход», спускаемый аппарат которых имел форму шара и не обладал аэродинамическим качеством, происходило по баллистической траектории. Неуправляемый спуск выполняется сравнительно просто. В таком случае на спускаемый аппарат действует только сила сопротивления воздуха, зависящая от высоты, скорости снижения и площади поперечного сечения аппарата. После разделения корабля на отсеки спускаемый аппарат совершает неуправляемый полет в атмосфере

Схема управляемого спуска.



Земли по баллистической траектории. В плотных слоях атмосферы происходит аэродинамическое торможение аппарата, его скорость уменьшается примерно до 200 м/с. Затем вводится в действие парашютная система, снижающая скорость до посадочной.

При баллистическом торможении спускаемого аппарата в плотных слоях атмосферы перегрузки возрастают очень резко и достигают 8—10 единиц. Это почти предел физических возможностей человека.

Так обстоит дело с перегрузкой при неуправляемом, или баллистическом, спуске. При таком спуске нельзя добиться высокой точности посадки в заданном районе, так как не представляется возможным учесть все факторы, влияющие на формирование траектории спуска.

Лучшие условия для космонавтов при спуске и большая точность приземления достигаются при управляемом спуске корабля, когда используется его аэродинамическое качество. *Аэродинамическим качеством* называется отношение подъемной силы аппарата к силе лобового сопротивления. Однако такой способ снижения с орбиты потребовал преодоления многих технических трудностей. Необходимо было найти наиболее приемлемую форму спускаемого аппарата, создать систему, обеспечивающую управление аппаратом как на внеатмосферном, так и на атмосферном участке полета.

Система, установленная на корабле «Союз», стабилизирует спускаемый аппарат на внеатмосферном участке спуска, выполняет программные развороты аппарата для ориентированного входа в атмосферу, управляет дальностью спуска.

Исполнительными органами управления спускаемого аппарата являются бортовые реактивные двигатели малой тяги, установленные в его корпусе. В качестве чувствительных элементов применяются гироскопические приборы. При управляемом спуске перегрузки снижаются до 3—4 единиц и становится возможным повысить точность приземления. На высоте около 10 км вводится в действие парашютная система. Перед приземлением включаются двигатели мягкой посадки.

Полет окончен. Советская земля, земля первооткрывателей космоса, земля строителей коммунистического общества, встречает космонавтов.

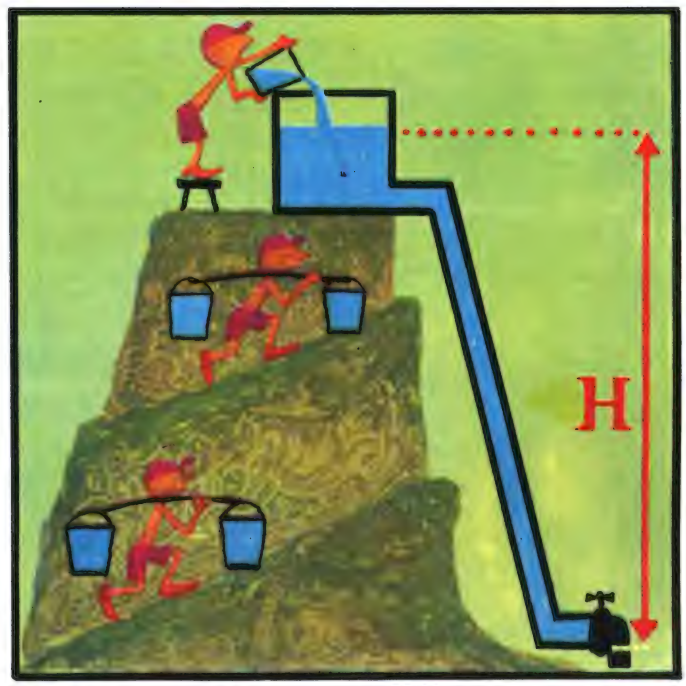
Как вода течет по трубам

(механика сплошных сред)

Наверное, вы думаете, что этот вопрос прост и внимания не заслуживает. Вода жидкая, она всегда и везде течет: журчит в ручейке, течет из крана, капает с крыши, струится под землей. На то она и вода. Все ясно и просто, и нет ничего особенного в том, что вода течет по трубам.

Ошибаетесь — этот вопрос далеко не так прост и очень важен. Только тот, кто хорошо разберется в том, как вода течет по трубе, поймет, почему самолет поднимается в воздух и бушуют волны на море, а мы можем петь и разговаривать.

Но те, кто еще не выучил или забыл законы Ньютона, за это пусть и не пробуют браться. Пусть лучше сначала учебник посмотрят. Итак:



Как вода течет по трубам

Задача первая

Достаточно высоко, на горе, а если хотите, то на крыше — где вам угодно, поставлена большая бочка, из нее проведена вниз труба. По трубе из бочки должна течь вода.

Что для этого надо сделать?

Это задача простая. Конечно, прежде всего нужно, чтобы в бочке была вода. Из пустой бочки она не потечет. Значит, надо в бочку воду налить. Как? Ответ ясен: придется воду доставить наверх. Понятно, что надо будет хорошенько поработать — не так-то легко таскать воду в гору.

Сколько же придется затратить работы?

В этом и должны помочь великий Ньютон и школьный учебник.

Решим, что в бочке помещается M килограммов воды. Много это или мало — для расчета все равно. Согласно законам Ньютона сила, с которой Земля притягивает все, что на ней находится, как и любая другая сила, равна произведению массы на ускорение. Ускорение свободного падения давно известно, оно равно увеличению скорости на g метров в секунду. Когда придется тащить воду в гору, надо будет преодолевать силу тяжести, равную Mg ньютонам. *Ньютон* (Н) — сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия.

Ускорение свободного падения — величина переменная, уменьшающаяся с удалением от Земли, вблизи поверхности Земли оно равно 9,8 м/с^2.

Работу, которую придется совершить, чтобы поднять воду на гору, вычислить нетрудно. Для этого следует умножить силу на пройденный путь. А путь в нашем случае равен высоте горы H (заглянем еще раз в учебник). Следовательно, работа может быть вычислена по формуле

$$W = MgH.$$

Наверное, еще многие наши читатели недолюбливают формулы. Но ничего не поделаешь! Уравнения и формулы — очень хорошие, верные помощники и друзья при решении трудных задач.

Большая получилась работа или малая — решайте сами. Наверное, чтобы ее совершить, не мешает быть сильным и хорошо тренированным.

Задача вторая

Таскать воду на гору — дело тяжелое и неприятное. Удобнее качать ее снизу насосом по трубе прямо наверх, в бочку.

Чему будет равна совершенная работа?

Это подсчитать нетрудно. Качать придется насосом. Чтобы подать воду наверх, придется преодолевать немалое давление столба. Единица давления равна давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2. Эта единица очень мала. Она называется *паскаль* (Па).

Пусть это давление P паскалей. Если площадь рабочей поверхности поршня равна S квадратным метрам, то сила, которую придется нам приложить к поршню, будет равна PS ньютонам; а если за каж-

дое качание поршень проходит путь L метров, то работа будет равна PSL джоулей.

Обратите внимание, что произведение площади поршня на длину хода SL равно объему. Следовательно, в формулу входит объем перекачанной насосом воды: $Q = LS$ кубических метров.

Оказывается, работу насоса можно рассчитать совсем просто: она равна произведению давления на объем PQ. Качать воду вы можете сколько угодно долго и перекачать ее наверх сколько угодно много, формула от этого не изменится. Почему это так — придется сообразить самому.

Чтобы быть строгими в своем выводе, надо учесть и плотность воды (хотя она и равна почти точно единице). Обозначим ее буквой ρ, тогда объем воды выразится так: $\frac{M}{\rho}$. Окончательно работа, которую придется затратить, чтобы перекачать воду против давления P, равна

$$W = P\frac{M}{\rho}.$$

Если гора высокая и давление большое, то преодолевать его будет трудно, а если надо перекачать много воды, то качать придется долго и работу совершить немалую. Лучше это поручить мотору.

Работа совершена. Вода раньше была внизу, под горой. Теперь мы ее доставили наверх, на гору. Что изменилось?

Задача третья

Бочка полна. Можно открыть кран. Пусть вода течет вниз по трубе. Как она будет течь?

Вот эта задача очень трудна. Наверное, до сих пор еще ни один самый мудрый ученый до конца не сумел ее решить. Много теоретиков ломали над ней головы. Еще больше экспериментаторов изучали в лабораториях. Тысячи томов ученых изысканий написаны и опубликованы. Но задача о том, как вода течет по трубе, так до сих пор и остается до конца еще не решенной.

Все дело в том, что вода, как и любая жидкость, обладает вязкостью. А попытка учесть вязкость в подобных задачах сразу приводит к таким сложным уравнениям, что пока еще без упрощения ни один математик в мире с ними справиться не мог.

Придется и нам задачу пока упростить. Вместо настоящей воды мы будем рассматривать воду воображаемую, такую, у которой вязкость равна нулю, т. е. совсем нет вязкости. Такая вода будет литься по трубам совсем без трения и сопротивления.

Хотя и нет жидкостей без вязкости (за исключением жидкого гелия при температуре ниже 2,19 К), но для решения нашей задачи не так уж важно — существует ли на самом деле вода, лишенная вязкости, или нет. Зато очень важно, что с таким допущением задача становится удивительно простой. Только нам придется помнить, что правильно решить упрощенную задачу еще недостаточно, надо будет подумать, каков будет прок от найденного решения. К счастью, в случае нашей задачи это допущение не очень грубое — вязкость воды невелика. Вода текуча. Это не мед, не патока и не сапожный вар.

Решать задачу теперь будет легко. Правда, решение будет не очень точным, но найти приближенный ответ тоже очень важно. Итак, мы условились, что вязкости у воды нет, поэтому можно считать, что вода по трубам течет без трения.

Но тогда совершенно все равно, где течет вода — скользит ли внутри трубы или падает вне ее,— трения ведь учитывать не надо. Просто можно считать, что она падает под действием силы тяжести, как любое тело. Задача становится совсем легкой.

Ускорение свободного падения известно, оно равно g м/с^2. Примем, что тело (камень, вода) падает t секунд. Скорость падения в конце пути будет равна gt м/с. Пройденный путь (а он в нашем случае равен высоте горы) будет:

$$H = \frac{gt^2}{2}.$$

Какую же работу совершит сила тяжести, заставляя воду падать вниз? Работа всегда равна произведению силы на пройденный путь:

$$W = F \cdot H.$$

Сила тяжести равна Mg. Следовательно,

$$W = Mg \cdot \frac{gt^2}{2}.$$

Замечательно, что существуют формулы! Они в трудный момент исследователю открывают глаза. Главное, надо научиться понимать, о чем они говорят. Полученную формулу сначала следует переписать вот так:

$$W = M \cdot \frac{(gt)^2}{2},$$

а затем, подметив, что произведение gt представляет собой скорость v, соответственно заменить в формуле. Тогда сразу станет ясно, что работа, совершенная силой тяжести, перешла в энергию движущейся воды:

$$W = M \cdot \frac{v^2}{2}.$$

Такую работу совершает сила тяжести, пока вода стекает с горы; и, следовательно, такую же работу придется затратить для того, чтобы поднять воду обратно на гору. Это нетрудно сделать, если устроить хороший фонтан, у которого начальная скорость струи достаточно высока — не меньше, чем следует по выведенной формуле, и направлена вверх. Вспомните, как работают пожарные брандспойты.

Очень важно

Найденный нами результат очень важен. Великий закон сохранения энергии справедлив всегда. Полученная нами формула применима не только к нашему частному случаю. Работа сил, действующих на тело, не исчезает. Она переходит в его энергию движения — в кинетическую энергию, как ее называют физики.

В формулу для кинетической энергии движущегося тела входят всегда только две величины: масса и скорость. Для формулы все равно, масса ли воды или камня, мала она или велика. Любое движущееся тело: автомобиль, космический корабль, бегущий мальчишка, кулак боксера, Земля на своей орбите, электрон в атоме или в телевизионной трубке — обладает одинаково выражающейся энергией движения — кинетической энергией $\frac{Mv^2}{2}$. Определить ее всегда бывает нетрудно: надо знать массу тела и измерить его скорость.

Конечно, кинетическую энергию тела, например энергию падающей воды, можно использовать для получения полезной работы самым различным образом. Вода с успехом работает на гидроэлектростанциях. Чтобы убедиться в этом, достаточно повернуть выключатель.

Формулу для кинетической энергии движущегося тела, которая нужна и ученику и академику, можно, пожалуй, с полным основанием назвать самой важной, самой главной формулой не только физики, но и всего естествознания.

Необходимое замечание

Строго говоря, в нашем рассуждении мы очень упростили задачу. Мы не обратили внимания на то, что труба может быть проложена наклонно, что на разных участках она может иметь различное сечение, и, главное, не учли, что труба будет обязательно заполнена водой полностью, без разрывов, и поэтому внутри трубы поток не может течь с ускорением. Через любое сечение трубы при установившемся потоке в каждую секунду будет протекать один и тот же объем жидкости.

Но это никак не может изменить полученного результата — закон сохранения энергии незыблем: кинетическая энергия потока будет равна работе, совершенной силой тяжести.

Вопросом о том, как фактически распределится ускорение в системе, мы сейчас заниматься не будем. Впрочем, вы и сами можете подумать над этой интересной темой.

Закон постоянства потока в различных сечениях трубы очень важен. Он выражается простыми уравнениями, которые называются *уравнениями неразрывности:*

$$M_1 = M_2 = \ldots = \text{const}.$$

Эти уравнения — прямое следствие закона сохранения массы вещества. Они обозначают, что через любое сечение трубы проходит одна и та же масса жидкости за одно и то же время. Так как $M = vs\rho$, а мы считаем, что жидкость несжимаема, то $v_1 s_1 = v_2 s_2 = \ldots = \text{const}$. Из этих уравнений следует вывод: в узком сечении трубы скорость потока большая, в широком сечении скорость его мала.

Теперь следует немного подумать...

Конечно, задачи, которые мы только что решали в порядке подготовки, не очень сложны, но все же к полученным результатам надо внимательно присмотреться и над ними подумать.

Обсуждая, как поднять воду наверх, мы сообразили, что это можно сделать по крайней мере тремя способами: просто перетаскать ее, хотя бы в ведрах, наверх; подать воду снизу насосом; воспользоваться для этой цели струей из пожарного брандспойта, хотя это и не очень удобно.

Соответственно в результате нашего исследования мы сумели найти три выражения для работы, которую нам придется для этого затратить.

В первом способе приходится непосредственно поднимать воду на гору и затрачивать работу

$$MgH.$$

Во втором — работа производится против давления P и равна

$$P\frac{M}{\rho}.$$

Чтобы можно было воспользоваться третьим способом, надо придать струе начальную скорость v, чтобы струя по крайней мере достигла вершины. Для этого необходима работа

$$\frac{Mv^2}{2}.$$

Разумеется, что если каждый раз поднимать одно и то же количество воды на одну и ту же высоту, то и затраченная работа будет тоже одна и та же, какой бы способ для подъема мы ни применяли. Это тоже следует из закона сохранения энергии.

Только не надо забывать, что при выводе мы пренебрегли такими обстоятельствами, как затрата работы на преодоление трения, при котором энергия бесполезно рассеивается, превращается в тепло. Полученные нами выражения имеют поэтому приближенный характер. Но не следует беспокоиться — точность полученного результата нам будет вполне достаточной.

Понимать и истолковывать формулы часто бывает не так-то просто. Нужно уметь обращать внимание и учитывать значения не только тех величин, которые в них явно входят, но и тех, которые в формулах отсутствуют; а это-то как раз часто и бывает наиболее важным.

Присмотримся теперь к найденным выражениям еще раз повнимательнее:

во все три формулы входит масса — заметим и запомним это;

в первой нет ни давления, ни скорости;

во второй нет ни скорости, ни высоты;

в третьей отсутствуют высота и давление.

И это очень важно, так как отсюда следует, что если вода поднята на некоторую высоту, то все равно, будет ли она течь или находиться в покое, будет ли она сжата или нет, по выведенной формуле можно вычислить увеличение ее запаса энергии, связанное с подъемом. Если вода сжата до большого давления, то нам все равно, где она находится — вверху или внизу, течет она или нет, мы так же легко и просто рассчитаем, насколько возрастет ее энергия. А уж если вода течет, то безразлично где — внизу или наверху, под давлением или нет. Кинетическая энергия ее от этого зависеть не будет.

Только теперь мы можем приступить к решению основной задачи.

Задача главная, с удивительным решением

Бочка наполнена. Труба проложена. Откроем кран — вода потечет по трубе. Как она будет течь?

Все необходимое для приближенного решения этой задачи мы уже подготовили и теперь можем без особого труда вывести закон, управляющий течением воды по трубам.

Вы, конечно, помните, что мы условились считать воду лишенной вязкости. Отметим, что мы незаметно сделали еще одно допущение: приняли, что вода несжимаема, а то нам пришлось бы учитывать работу сжатия. Но вода и на самом деле почти несжимаема.

Итак, кран открыт. Вода течет по трубе. Вытекает она из емкости, поднятой на достаточно большую высоту H, где энергия воды равна W джоулей, и мы умеем теперь ее без труда вычислять.

Чтобы найти решение нашей главной задачи, мы поступим очень просто. Представим себе, что где-нибудь, в любом месте на склоне горы, на высоте всего h метров мы выбрали произвольно какой-нибудь достаточно короткий участок трубы и установили на

нем измерительные приборы: манометр — для измерения давления и расходомер — для определения скорости потока. Ясно, что они могут быть установлены только ниже того уровня, где находится запас воды.

Измерим точно давление в трубе на выбранном участке. Оно обязательно каким-нибудь да будет. Пусть оно окажется равным p паскалей. (Конечно, $p<P$, этого и объяснять не требуется.) Измерим на том же участке скорость потока в трубе. Пусть она будет равна v м/с.

Вот теперь мы легко можем найти выражение для полной энергии воды, протекающей по трубе на выбранном нами коротком участке.

Вода на этом участке находится на высоте всего лишь только h метров. Теперь мы можем сразу написать величину соответствующей части ее энергии. Она равна

$$Mgh.$$

Вода сжата под давлением, которое мы измерили и нашли, что оно равно p паскалей. Следовательно, вода обладает еще дополнительной энергией:

$$p\frac{M}{\rho}$$

В то же время вода течет по трубе со скоростью v м/с. Ее кинетическая энергия равна

$$\frac{Mv^2}{2}.$$

Полный запас энергии воды на высоте h, при давлении p, текущей со скоростью v, очевидно, будет равен

$$Mgh+p\frac{M}{\rho}+\frac{Mv^2}{2}$$

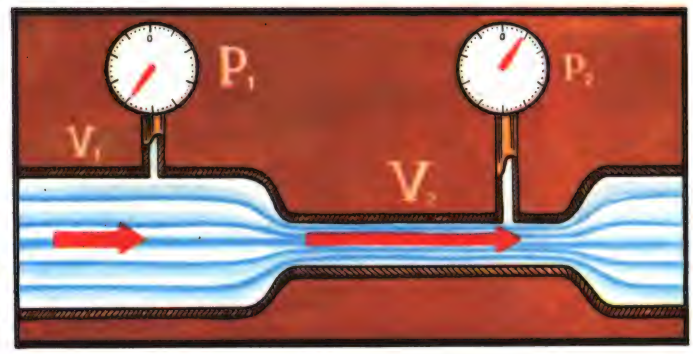
Чему же эта сумма должна быть равна? Мы условились, что трение отсутствует. Значит, некуда расходоваться тому запасу энергии, который мы сообщили воде, подняв ее наверх.

Следовательно, на основании закона сохранения энергии, сколько энергии у воды было наверху, столько же будет на любом участке движения воды по трубе:

$$MgH=W=Mgh+p\frac{M}{\rho}+\frac{Mv^2}{2}.$$

Это уравнение хотя и сложно с первого взгляда, но зато таит в себе так много интересного и неожиданного, что стоит преодолеть его сложность и не только с ним познакомиться, но и подружиться.

Прежде всего постараемся уравнение упростить. Сначала сократим массу воды, она ведь стоит и в правой и в левой части уравнения. Она от этого из уравнения не исчезнет, хотя и не будет в нем написана. Просто запомним, что мы в дальнейшем будем считать на один килограмм воды:



$$W=gh+\frac{p}{\rho}+\frac{v^2}{2}.$$

Отметим, что, как мы установили, слева в уравнении стоит постоянная величина $W=\text{const}$.

Теперь можем написать окончательно удивительное уравнение:

$$gh+\frac{p}{\rho}+\frac{v^2}{2}=\text{const}.$$

Оно может объяснить многое в том, как вода течет по трубам.

Что и как можно рассчитать с помощью выведенного уравнения!

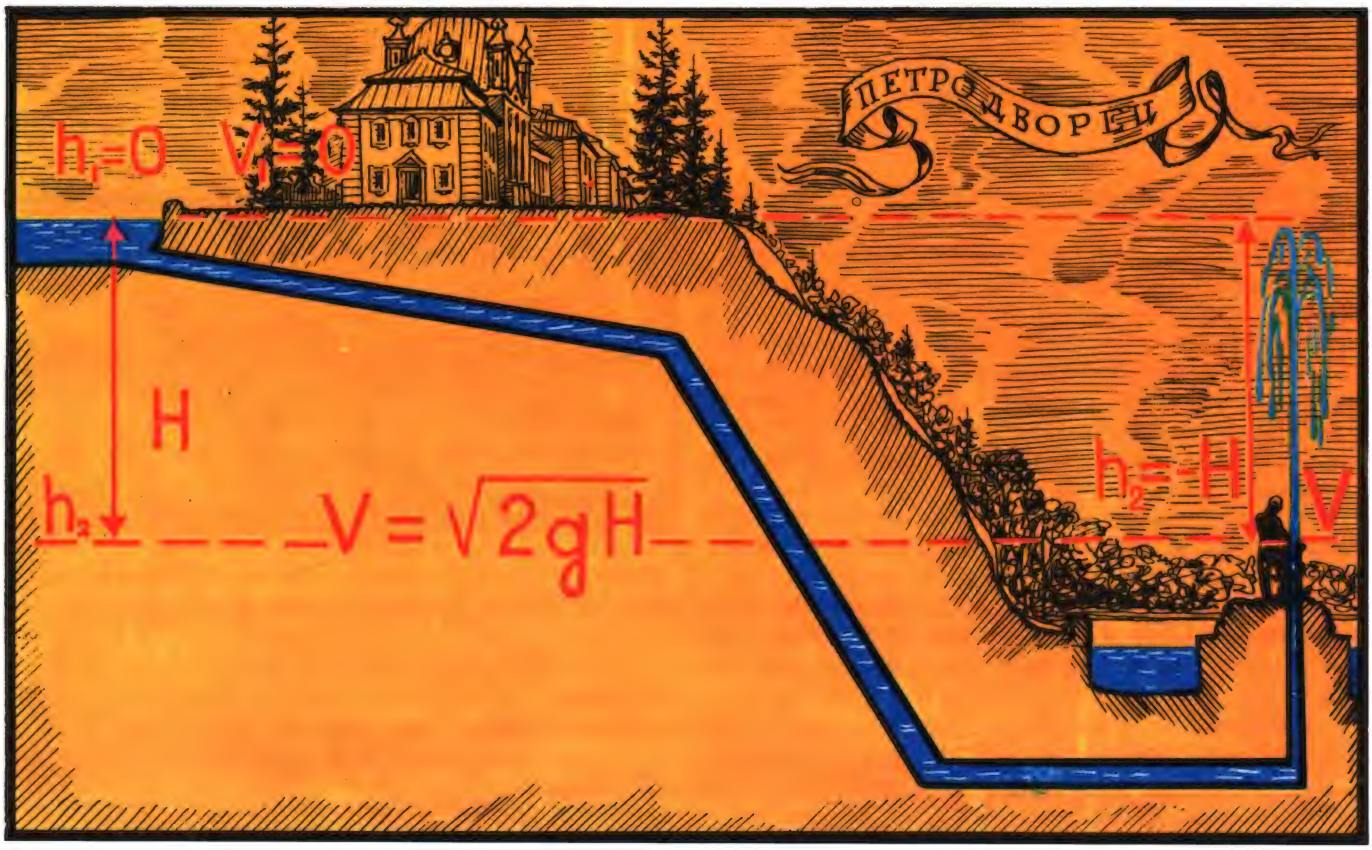
Много интересного, полезного и важного, и к тому же очень просто. Рассмотрим сначала *три* самых простых, но важных случая.

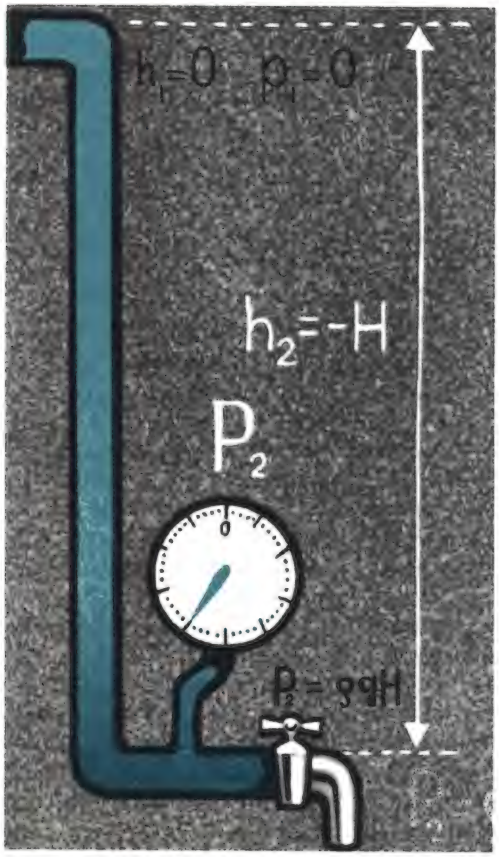
1. *Труба, имеющая разное сечение, проложена горизонтально.* Для такой трубы высота h повсюду одинакова и, следовательно, постоянна. Поэтому уравнение станет проще:

$$\frac{p}{\rho}+\frac{v^2}{2}=\text{const}.$$

Оно по-прежнему справедливо для любого участка трубы. Из него следует удивительный и очень странный результат: там, где скорость потока будет больше (в узких участках трубы), давление обязательно должно стать меньше. А в широкой ее части давление будет большим. Что это так, убедиться нетрудно, присоединив к трубе манометры.

Картину течения воды принято изображать при помощи условных линий — *линий тока*. Это путь, по которому будет плыть взвешенная в потоке маленькая легкая частица. Линии тока нигде не прерываются. Там, где скорость потока выше, они сближаются теснее; там, где скорость падает, они расходятся.





2. *Давление в трубе одинаково повсюду.* Это допущение вполне оправдано, если труба, в которой течет вода, достаточно широкая и потерей напора на сопротивление трубы можно пренебречь (не забывайте, что вода все-таки вязкая).

Уравнение упростится по-иному:

$$gh + \frac{v^2}{2} = \text{const}.$$

Кстати, теперь по нему удобно рассчитывать фонтаны и пожарные насосы.

3. *Вода в трубе совсем не течет. Скорость равна нулю.* Тогда уравнение примет новый вид:

$$gh + \frac{p}{\rho} = \text{const}.$$

По нему теперь совсем просто рассчитывать гидростатическое давление, например, в трубах водопровода. А это необходимо, чтобы знать, насколько трубы должны быть прочны, чтобы их не разорвало.

Как видите, с помощью нашего уравнения можно многое рассчитать.

Надо теперь найденное уравнение хорошенько рассмотреть, обсудить и обдумать

Это всегда необходимо. Каждое уравнение, которое вам придется вывести самостоятельно или с которым вы познакомитесь впервые, должно быть очень внимательно рассмотрено и обсуждено. Вообще, наверное, нет ничего удивительнее математических

уравнений. Они самое главное оружие человека в борьбе за овладение тайнами природы и за дружбу с ее безграничными силами.

Уравнения ведут корабли в космосе; уравнения строят микроскопы, увеличивающие в миллион раз; уравнения расщепляют атом, синтезируют алмазы, строят новые заводы.

Но надо уметь понимать их. Надо уметь определять, что может дать новое уравнение, что можно от него требовать, какие оно даст возможности, когда его можно применять и когда оно неприменимо, где границы, в которых оно остается справедливым. Поэтому и нам придется обсудить записанное выше уравнение, выведенное при решении скромного, узкого и частного вопроса — как вода течет из бочки по трубе?

Рассмотрим его внимательно. Прежде всего отметим одно замечательное обстоятельство. Где в этом уравнении гора? В сущности, в нем нет на нее никаких указаний. Ее высота исчезла — сократилась. Гора оказалась не нужна. Уравнение справедливо всегда и всюду, где бы вода ни текла по трубам. Гора помогла нам вывести это уравнение, и больше она не нужна.

Тогда возникает новый вопрос: а где в выведенном уравнении трубы? В нем ведь нет ни диаметра трубы, ни ее длины. Нет ни одной величины, которая могла бы хоть как-нибудь трубу характеризовать. Значит, и трубы не ограничивают область применения полученного уравнения.

Но и это еще не все. Мы все время упорно ведем разговор только о воде. А в полученном выражении нет и намека на воду. Никакие свойства воды в нем не отражены. Вода помогала нам вывести уравнение. Но, конечно, вместо нее можно было взять любую другую маловязкую жидкость — вывод бы не изменился.

Но почему только жидкость? Где в уравнении указание на то, что это именно жидкость? Из свойств вещества в него входит только плотность, которая принята постоянной, и больше ничего. Но ведь газ тоже обладает плотностью. И есть на Земле очень много процессов, в которых газ течет и не сжимается. Вспомните хотя бы ветер.

К чему же тогда применимо это замечательное уравнение? Ко всему на свете, что может течь и струиться, ко всем процессам, в которых движется маловязкая среда с постоянной плотностью. А таких процессов и таких сред в мире немало.

Ну, скажите, разве это не удивительно? Мы выводили уравнение для водопроводной трубы, а оно оказалось пригодным чуть ли не для целого света.

Даниил Бернулли (1700—1782).

Это уравнение впервые вывел Даниил Бернулли

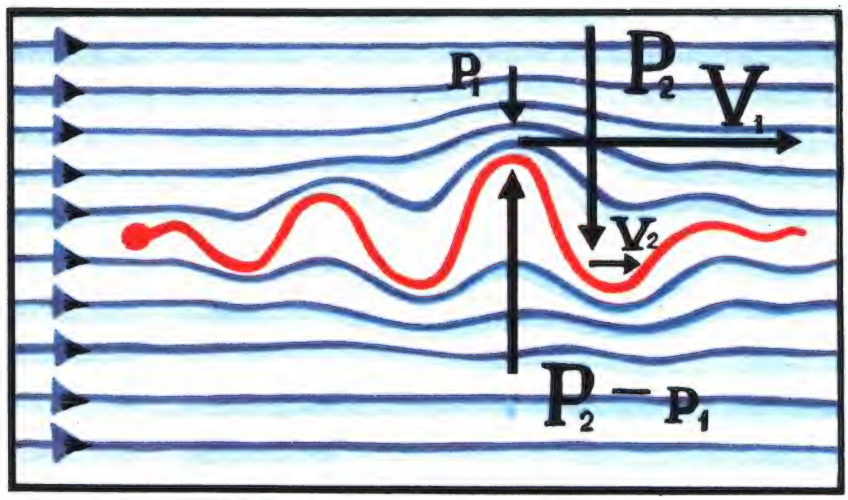
Следует помянуть добрым словом великого ученого, впервые сумевшего открыть связь между скоростью и давлением в потоке маловязкой среды и найти одно из самых важных уравнений гидродинамики. Это уравнение вывел в 1738 г. петербургский академик, замечательный математик, физик и механик Даниил Бернулли, который очень много сделал в науке.

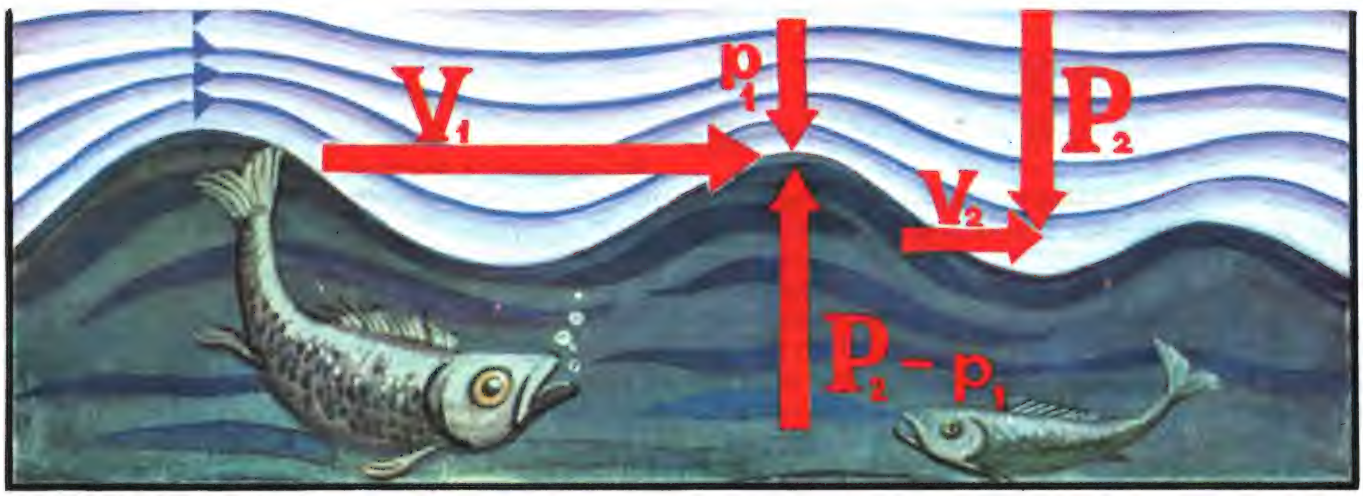
Одним из наиболее замечательных достижений гидродинамики по справедливости до сих пор считается уравнение, с которым вы только что познакомились. Оно выражает закон сохранения энергии для текучей среды и до наших дней справедливо носит славное имя Бернулли.

Посмотрим вокруг (и прислушаемся)

Только посмотрим пристально и внимательно. Все ли для нас ясно? Всё ли мы понимаем в том, что вокруг нас происходит и что нас окружает?

Сознайтесь, что ко многому мы настолько привыкли, что даже стали воображать, что все понимаем. И давно уже перестали понимать, что на самом-то деле во многом, даже в самом простом, ровно ничего не понимаем. Нас постоянно окружает великое множество «почему?». И на многие из них, на самые простые и привычные, на самые непонятные, поможет найти ответ уравнение Бернулли.





Почему...

...знамя трепещет и вьется

Ветер дует ровно. И даже если нет ветра, а просто идет колонна демонстрантов по площади и движутся они равномерно, развернутые красные знамена трепещут и колышутся. Почему же знамя не вытягивается неподвижно, не образует в ровном потоке воздуха гладкое натянутое полотнище? Почему оно трепещет и вьется как живое?

Уравнение Бернулли легко объяснит эту загадку. Если возникнет хотя бы ничтожный изгиб, то сразу же с выпуклой стороны полотнища увеличится скорость стесненного изгибом воздушного потока; с вогнутой же стороны скорость воздуха упадет. По уравнению там, где скорость больше, давление меньше. Там, где она меньше, давление возрастет. Разность давлений по обе стороны полотнища изогнет его еще больше, изгиб увеличится и побежит вдоль знамени как волна. Возникнет сразу новый изгиб, и знамя, подчиняясь уравнению, будет всегда трепетать как живое.

...поднимаются волны на море

Пусть над зеркальной гладью морской поверхности во время полного штиля начнет веять самый слабый, ровный и постоянный ветерок. Если хотя бы в одном месте появится даже ничтожная неровность поверхности воды (а это всегда возможно) и возникнут еле заметные вершина и впадина волны, как тотчас же скорость ветра над гребнем волны возрастет и, согласно уравнению Бернулли, давление воздуха над волной в этом месте упадет. Над впадиной скорость воздушного потока станет меньше, а давление

больше. Возникнет перепад давлений между вершиной волны и ее основанием. Этот перепад еще более поднимет гребень волны и углубит впадину между гребнями. Волнение усилится, это вызовет еще большее изменение разности скоростей ветра, что повлечет еще больший перепад давлений. Легкая волна, если ветер станет достаточно сильным, перейдет в огромные волны, опасные для мореплавателей.

Не следует беспокоиться о том, где и как возникнет самая первая причина. Буря может начаться и там, где вильнет хвостиком рыбка.

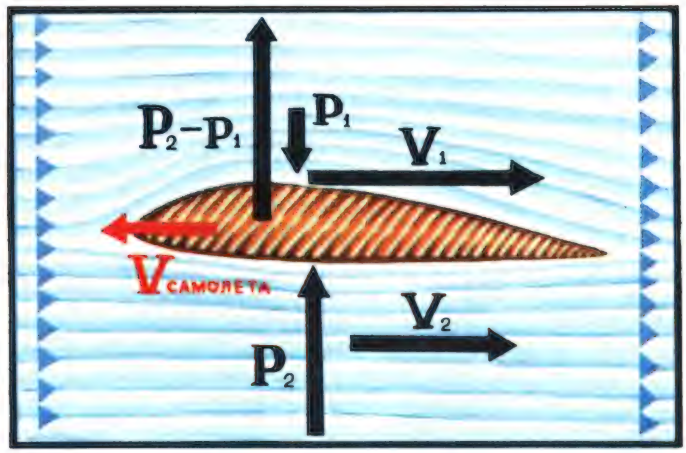
От эффекта Бернулли зависит появление волн и их усиление, но это, конечно, не значит, что, зная одно уравнение, мы уже всё знаем о таком сложном и до сих пор еще до конца не изведанном явлении, как волны на море. Они зависят и от трения воздуха о поверхность воды, и от вязкости воды и воздуха, и от образования вихрей, и от напора ветра, и от многих других причин. Их изучает очень увлекательная и очень непростая наука, которая так и называется — *физика моря*.

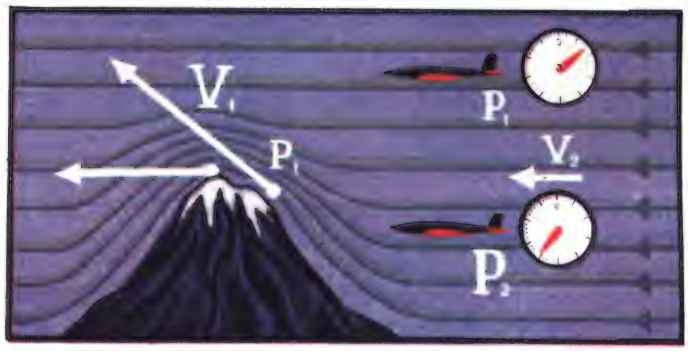
...самолеты взлетают в небо

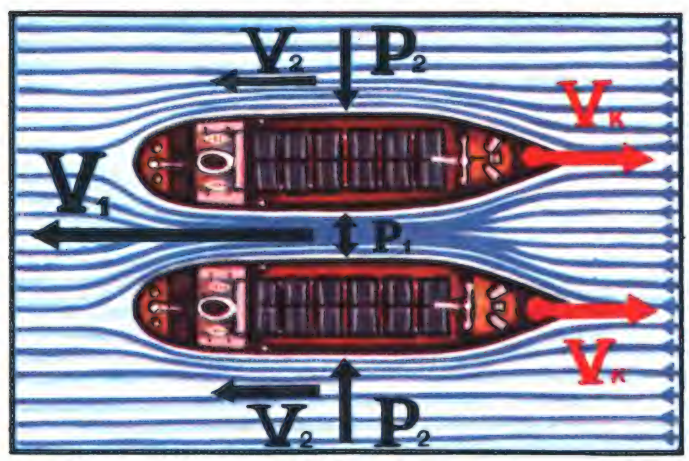
У каждого самолета профиль сечения крыла строго рассчитан. Верхняя поверхность крыла выпуклая. Это сделано для того, чтобы встречный воздушный поток, обтекая ее, повышал свою скорость, подобно тому как ускоряется поток воды в узком сечении трубы. Поэтому давление над крылом самолета падает очень значительно и возникает разность давлений между нижней и верхней поверхностями крыла самолета. Образующееся над крылом разрежение и поднимает самолет в небо.

Но этим не ограничивается значение уравнения закона сохранения энергии для невязкой несжимаемой среды. Помнить и учитывать его должен конструктор, создающий новые воздушные корабли, пилот, управляющий полетом самолета.

Представьте себе, что самолет должен в тумане перелететь через высокий горный хребет. В слепом полете командир ведет воздушный корабль по приборам. В его кабине обязательно находится очень важный прибор — *альтиметр*, который показывает высоту полета,— это точный манометр, измеряющий давление воздуха за бортом самолета. Чем выше поднимается самолет, тем ниже давление. Но если над землей бушует сильный ветер, воздушные потоки переваливают через горы и скорость ветра над вершинами может стать даже ураганной. Давление на этой высоте сильно упадет. Что будет показывать альтиметр, что может подумать летчик и что может случиться — сообразите сами.







...корабли не ходят рядом

Капитаны кораблей тоже не должны забывать о законе Бернулли. Корабли не ходят в море рядом. Почему? Разве плохо было бы после многодневного плавания в одиночестве двум кораблям, повстречавшимся в океане, пройти несколько миль рядом, бок о бок. Можно и побеседовать с новыми людьми и

даже побывать друг у друга в гостях, не спуская шлюпок. Но этого делать нельзя! Почему? Посмотрите рисунок на стр. 93 (внизу).

Относительная скорость потока воды, сжатого между корпусами быстроходных кораблей, при их сближении сильно возрастет. Давление воды между корпусами кораблей резко упадет, и огромным напором более высокого внешнего давления корабли будут прижаты друг к другу и даже могут потерпеть аварию. Уравнение Бернулли запрещает кораблям идти в океане рядом. Моряки это знают очень хорошо.

...шипит вода, вытекая из крана

Если водопроводный кран чуть-чуть приоткрыт, то при достаточном напоре воды скорость потока в самом узком просвете крана может сильно возрасти, при этом давление понизится настолько, что даже станет ниже упругости насыщенного водяного пара,— и холодная вода в кране закипит. Образующиеся в кране мельчайшие пузырьки водяного пара, попадая в расширенную часть, где скорость потока замедляется и давление повышается, будут конденсироваться и исчезать. При этом каждый пузырек, «схлопываясь», будет издавать слабый звук. Пузырьков образуется много, их удары сливаются в непрерывный шум — вода начинает шипеть.

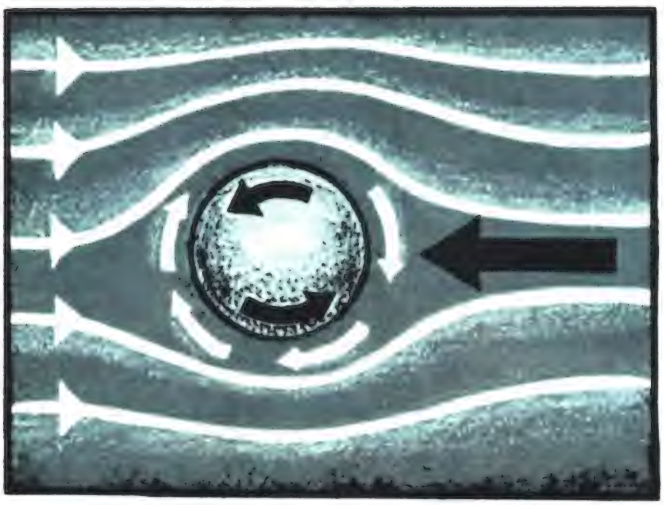
Точно так же вода шипит, когда начинает закипать чайник.

...мы можем петь и разговаривать

Что в гортани человека есть голосовые связки, знает каждый. Под действием струи воздуха, выходящей под давлением из легких, они колеблются. Их колебания и являются причиной возникновения звуковых колебаний воздуха. Натяжение мышечных волокон голосовых связок, изменение формы резонирующей полости гортани и полости рта определяют частоту и тембр звуковых колебаний. Поэтому-то мы и можем разговаривать и петь. Все ясно? Нет, далеко не все!

Остается неясным главное: почему воздушный поток заставляет вибрировать голосовые связки? Во время дыхания голосовые связки в гортани широко раздвинуты и воздух свободно проходит между ними с малой скоростью, поступая в легкие. В момент разговора мышечные волокна голосовых связок напрягаются, сближаются между собой и образуют узкую щель. Скорость воздушного потока резко возрастает, а давление у краев связок падает. Вследствие этого они почти смыкаются, узкая щель между ними почти полностью закрывается, скорость воздуха резко падает. Давление в просвете между краями голосовых связок возрастает вновь, и они снова расходятся, голосовая щель раскрывается. Возникает звук.

Оказывается, есть прямая связь между струей воды, вытекающей из крана, и песней жаворонка. Одно и то же уравнение многое объясняет.



Почему и как...

...работает обыкновенный пульверизатор;

...действуют паровые и водоструйные эжекторные насосы, применяемые на заводах для создания вакуума;

...происходит то, что вы увидите сами, если подуете вдоль бумажного листа;

...пляшет и не падает легкий шарик в струе фонтана, даже если эта струя воздушная;

...сворачивает в сторону во время полета очень быстро вращающийся — «резаный» — теннисный мяч.

И многое, многое другое, что сумеет заметить ваш внимательный глаз, попробуйте понять и объяснить самостоятельно. Постарайтесь понять, как и почему мог двигаться необычный корабль с огромными вращающимися цилиндрами вместо парусов. Сообразите, откуда должны были дуть ветры и как вращались башни-цилиндры, когда этот корабль пересекал Атлантический океан (рис. на стр. 96).

Можете даже сами проделать специальный опыт по демонстрации эффекта Бернулли. Опыт этот всегда удается, а результат получается очень занятный и поучительный. Надо свернуть на карандаше и склеить бумажную трубочку. Приклеить к ней на один конец диск из плотной бумаги. Это и есть демонстрационный прибор. Положите на стол бумажный лист. Поднесите диск к листу и посильнее подуйте в трубочку (рис. на стр. 96).

То, что при этом произойдет, и то, что при этом вы увидите и услышите, в объяснении уже не нуждается.

А как же все-таки течет настоящая вода по трубам (и не по трубам)!

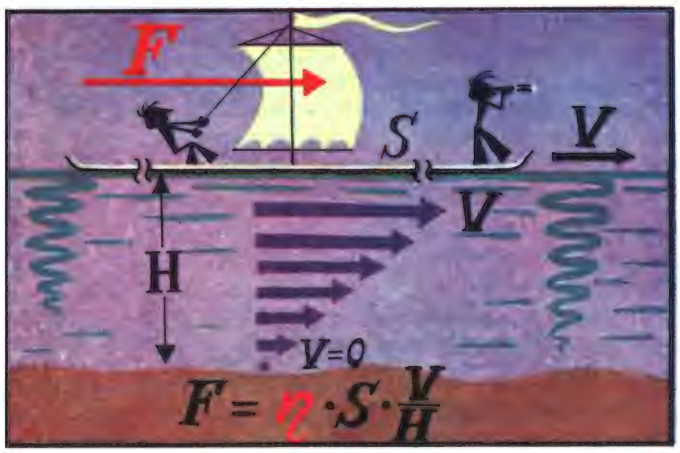
Этот вопрос, как уже было сказано, очень труден, потому что настоящая вода вязкая. Как происходит движение в вязкой сплошной среде, нам знать необходимо. Течет вода из крана, горючее по нефтепроводу, плывут корабли в океане, текут по равнинам реки, летят воздушные лайнеры — мы должны знать законы, управляющие их движением. Полностью все, что происходит в потоке вязкой среды, еще до сих пор не выяснено. Ученые-теоретики сумели найти самые общие уравнения, по которым, казалось бы, можно рассчитать движение жидкой среды с учетом ее вязкости, но эти уравнения оказались настолько сложными, что решить их для всех, даже практически важных, случаев и то невозможно.

Но многие интересные и важные виды потоков исследованы и изучены достаточно подробно.

Что такое вязкость

Это, наверное, удобнее всего представить себе на наглядном примере. По спокойному, очень мелкому морю, с ровным дном плывет такой большой плот, что на краевые сопротивления его бортов можно не обращать внимания.

Слой воды, прилегающий к нижней поверхности этого плота, будет смачивать ее и увлекаться плотом



с той же скоростью. Слой воды у самого дна будет оставаться неподвижным. Промежуточные слои будут двигаться с разными скоростями, равномерно убывающими с глубиной. На преодоление внутреннего трения между движущимися слоями воды должна быть затрачена работа. Несмотря на то что плот движется равномерно, должна быть приложена сила F, необходимая, чтобы его тянуть. Опыт показывает, что она будет тем больше, чем больше скорость движения плота v, чем больше его площадь S и чем меньше глубина H (рис. внизу).

Все это можно передать простым уравнением:

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{v}{H}.$$

Оно выражает закон вязкого трения, также впервые установленный Ньютоном.

Коэффициент пропорциональности η (так называемая *динамическая вязкость*) определяет сопротивление движению в вязкой среде (не только в жидкой, но и в газообразной и даже в твердой — ведь из металла штампуют, вытягивают и формуют изделия).

Динамическая вязкость зависит от природы среды, она изменяется с температурой. Динамическая вязкость численно равна силе, действующей на единицу площади поверхности, находящейся в движущейся среде, в которой градиент скорости равен единице:

$$\eta = \frac{F/S}{v/H}.$$

Это соотношение определяет единицу вязкости: числитель F/S имеет размерность давления и должен выражаться в паскалях, а величина H/v, обратная знаменателю, имеет размерность времени и выражается в секундах. Следовательно, размерность динамической вязкости — произведение давления и времени, а ее единица — паскаль-секунда (Па · с). Почему-то физики особого названия для этой величины придумывать не захотели.

Замечательно, что динамическая вязкость часто встречается вместе с плотностью в виде отношения $\frac{\eta}{\rho}$. Эта величина называется *кинематической вязкостью* и обозначается

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Единица кинематической вязкости — метр в квадрате на секунду ($м^2/с$),— несмотря на большую важность, никак не называется. Если считать, что *знать*, как происходит явление,— это значит уметь описать его на языке математики — уметь составить точное уравнение и уметь предсказать, как будет происходить процесс при любых условиях (т. е. уметь вычислять), то придется признаться, что, строго говоря, мы еще не знаем, как настоящая, вязкая вода течет по трубам.

Когда не справляется теория, ей должен помочь опыт. Знакомство с движением настоящей воды по трубе проще всего начать с самого обычного примера — с обыкновенной водопроводной трубы. Если ее сделать прозрачной (хотя бы из стекла) и ввести в поток струйку раствора краски, то можно будет увидеть, что происходит в воде, текущей по трубе. А там происходит так много важного и удивительного, что стоит на этом остановиться подробнее.

По движению окрашенных струек можно наглядно изучить строение водяного потока. Рассмотрение этого очень сложного явления, конечно, удобнее начать с самого простого и доступного — с медленного потока.

Что происходит в воде, медленно текущей по трубе

Конечно, движение окрашенных струек в точности соответствует линиям тока жидкости. Они плавно следуют за всеми изменениями формы трубы, нигде не пересекаются, не искажаются, не размываются.

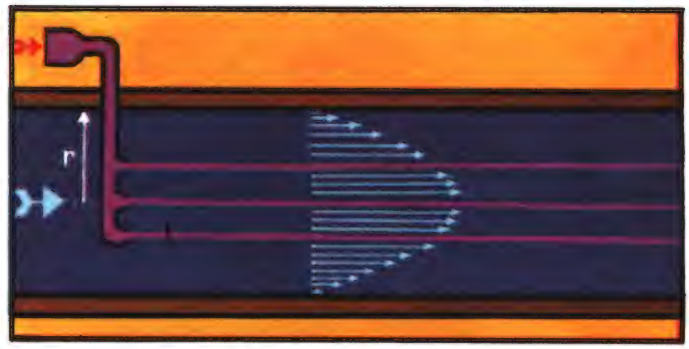
По скорости продвижения струйки можно легко изучить распределение скоростей в потоке внутри трубы. Оказывается, наибольшая скорость воды в центре трубы. Чем ближе к стенкам, тем она меньше; у самых стенок скорость равна нулю, жидкость словно прилипает к стенкам и остается в покое. Это совсем простой случай, его легко можно рассчитать теоретически.

Формула медленного движения воды по трубе носит имя французского физиолога Пуазейля, изучавшего движение крови в кровеносных сосудах и открывшего закон течения вязкой жидкости в трубах. Вот эта важная формула:

$$Q = \frac{\pi (p_1 - p_2)}{8\nu l} \cdot r^4.$$

Из нее следует, что количество воды Q, протекающей по трубе за одну секунду, будет тем больше, чем выше разность давлений на концах трубы (напор); тем меньше, чем труба длиннее; тем меньше, чем больше кинематическая вязкость жидкости (например, у горячей воды вязкость меньше и ее протечет больше). Особенно сильно влияет диаметр трубы. Расход протекающей жидкости прямо пропорционален радиусу трубы в четвертой степени (r^4). Через трубу, вдвое более толстую, воды протечет в 16 раз больше.

Уравнение Пуазейля имеет огромное значение в технике. По этому уравнению очень часто рассчитываются трубопроводы. Но следует помнить, что оно справедливо только при условии, что в трубах существует строго упорядоченный поток: такой, при котором нет перемешивания между соседними слоями текущей жидкости. Такое течение называется *ламинарным*. Только в ламинарном потоке введенные контрольные струйки раствора краски текут, нигде не разрываясь и не перемешиваясь.



Что происходит в быстром потоке воды

Это можно легко наблюдать на опыте с помощью тех же окрашенных струек в прозрачной трубе. Если начать постепенно повышать скорость движения воды, то сначала картина потока не изменяется. Линии тока остаются такими же ровными и плавными, пока скорость водяного потока не достигнет некоторого предельного значения, всегда приблизительно одного и того же для одной и той же трубы. При еще большей скорости картина внезапно и удивительным образом меняется. Плавные линии вдруг начинают колебаться, извиваться, перемешиваются, и, что особенно интересно, при тщательном изучении оказывается — в потоке возникают вихревые движения. Ламинарное, упорядоченное движение вдруг внезапно переходит в беспорядочное, обладающее очень сложной и загадочной структурой. Это *турбулентное движение*.

При этом меняются все свойства потока, изменяется зависимость сопротивления трубы от расхода воды, меняется профиль скоростей и вся структура потока. Но по-прежнему скорость у самых стенок трубы равна нулю.

Структура турбулентного потока, несмотря на огромное значение для современной техники, остается еще загадкой. Теория бессильна перед расчетом турбулентного потока. Практике приходится широко пользоваться опытом, выражая его результаты в виде эмпирических формул. Трудности в расчетах крыла самолета, формы космической ракеты, турбины электростанции были бы совершенно непреодолимы, если бы замечательному английскому ученo-

Вверху — ламинарное течение; *внизу* — турбулентное течение.

му Осборну Рейнольдсу (1883) не удалось решить очень важный вопрос, который сразу сильно упростил решение многих практических задач.

Что такое «медленно» и что такое «быстро»!

Мы привыкли в обычной жизни говорить: «много» или «мало», «жарко» или «холодно», «быстро» или «медленно», не особенно задумываясь над тем, что такое «много» и что такое «мало». Где кончается «медленно» и начинается «быстро»?

Наука не терпит такой неопределенности. Наше изложение в предыдущих разделах статьи было по существу недопустимым: сказать, что при медленном движении поток ламинарный, а при быстром превращается в турбулентный, это еще почти ничего не сказать.

Что толку, если будет известно, что структура потока крови в кровеносных сосудах ламинарная, если необходимо знать, как рассчитать водоводы для гигантской электростанции. Ведь от того, какова структура потока, зависят размеры труб.

Вот на этот трудный и важный вопрос и был найден Рейнольдсом замечательный ответ. Он, проделав огромное число опытов, подметил, что если для разных труб, с различным диаметром d, и для разных жидкостей, с разной кинематической вязкостью ν, так подобрать значение средней скорости потока v, чтобы величина $\frac{v\,d}{\nu}$, характеризующая отношение инерциальных и вязких сил, оставалась постоянной, то независимо от того, каковы будут размеры труб, характер потока во всех случаях будет одинаков и вся его структура, расположение линий тока будут совершенно подобными. Отношение это еще замечательно тем, что оно безразмерно и его значение не зависит от выбора системы единиц. Обязательно проверьте это сами. Этой замечательной величине присвоено имя автора. Она называется *числом Рейнольдса* и обозначается Re.

Нарисовать турбулентный поток очень трудно. Его ни один художник изобразить не сумеет. Но увидеть легко может каждый, и для этого даже не нужно окрашенных струек и прозрачной трубы. Откройте немного кран водопровода и посмотрите на вытекающую струю. Сначала она ровная, гладкая, бесшумная, прозрачная, как стеклянная палочка,— это ламинарный поток воды из крана. Теперь откройте кран полностью. Если напор достаточен, струя преобразится, помутнеет, станет неровной, начнет шипеть, ее поверхность под влиянием внутренних вихревых движений будет быстро и сильно колебаться и даже может начать разрушаться. Повышая скорость, вы перешли предельное значение числа Рейнольдса, и струя воды стала турбулентной. Это критическое, предельное значение числа Рейнольдса для течения в цилиндрических трубах равно 2000—2400.

Посмотрите на дым из трубы — это хороший пример турбулентного движения.

Водопровод, самолет, корабль турбина

Но значение числа Рейнольдса далеко не ограничивается только возможностью определения характера потока в трубе. Оказывается, совершенно сходные закономерности свойственны любому потоку вязкой сплошной среды: и тогда, когда поток *протекает* в трубе; и тогда, когда он *обтекает* на своем пути какое-либо неподвижное тело; и, конечно, тогда, когда *тело движется* сквозь неподвижную среду.

Если скорости малы, поток плавно обтекает встретившееся на пути тело. Линии тока огибают его, не пересекаясь и не искажаясь. Поток ламинарный.

При повышении скорости характер течения вдруг меняется. На границе потока, около поверхности тела, в пограничном слое начинают возникать вихри, они уносятся потоком, сливаются вместе, образуя турбулентный след за телом. На образование этих вихрей расходуется энергия, и сопротивление тела потоку растет.

А самое замечательное в этом то, что обтекание любого тела потоком вязкой среды (воды, воздуха, любого газа, любой жидкости) определяется точно таким же числом Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}=\frac{v\cdot D}{\nu},$$

в котором v — по-прежнему скорость потока, ν — кинематическая вязкость, а D в этом случае обозначает так называемый определяющий размер тела. Как бы ни отличались друг от друга по размерам два подобных тела, их взаимодействие с потоком вязкой среды будет совершенно сходно, если в соответствии с размерами будут так подобраны значения скорости и вязкости, чтобы было обеспечено равенство чисел Рейнольдса.

Не надо строить новый самолет в натуральную величину для того, чтобы изучить его поведение в полете, достаточно сделать маленькую подобную модель и испытать ее в аэродинамической трубе при таких же значениях чисел Рейнольдса.

Невозможно наугад строить гигантскую электростанцию — возможные ошибки будут стоить слишком дорого. Но можно построить точную модель всей системы: и русла реки, и плотины, и водослива, и даже самой турбины. При тех же значениях чисел Рейнольдса результаты испытаний покажут, насколько надежно и выгодно будет работать будущая электростанция.

Раньше чем заложить на верфях океанский корабль, правильность расчета его корпуса проверяют

Наверное, многих читателей удивит, почему снимок Земли, сделанный советской автоматической станцией «Зонд-7», помещен в этом томе к статье «Как вода течет по трубам», а не к статье «Полет в космос». Конечно, он и там был бы тоже уместен. Но присмотритесь к этому замечательному снимку. Разве он не является прекрасной иллюстрацией к не познанным еще до конца законам

в *опытовом* бассейне, испытывая точную малую модель.

Результаты испытаний позволяют уверенно и точно предсказать быстроходность и экономичность будущего корабля.

Безгранична область применения законов механики жидкостей и газов в современной технике, бесконечны проблемы, которые решаются с ее помощью.

Казалось бы, совершенно ничем не схожи между собой турбина, корабль, плотина, самолет, нефте- и водопроводы (можно было бы привести еще множество примеров), и разве не удивительно, что наука дает возможность изучать и рассчитывать их при помощи одних и тех же законов, описывать их сходными соотношениями. Правда, уравнения современной гидродинамики часто оказываются настолько сложными, что хотя их возможно составить, но нельзя еще решить: современная математика часто бессильна перед сложностью и трудностью этих уравнений.

Но еще более удивительно, что совершенно к таким же уравнениям приводит теория явлений, связанных с взаимодействием магнитных полей и электрических токов,— *электродинамика*. Над этим стоит серьезно подумать.

Почему на газовых и на водопроводных трубах краны разные?

А в самом деле почему? На газовой трубе установлен простой пробковый кран. Он очень удобен. Достаточно повернуть его на четверть оборота, и линия надежно перекрыта.

На водопроводных трубах стоят гораздо более сложные краны, иначе устроенные. Надо довольно долго поворачивать рукоятку крана, чтобы его внутренний клапан на винтовой нарезке постепенно перекрыл отверстие для прохода воды. Сразу такой кран никак не закроешь.

До сих пор мы рассматривали только стационарные потоки, такие, в которых скорость в каждой точке можно было считать постоянной. Гораздо сложнее будет вся картина процесса и гораздо труднее его теория, если скорость потока резко изменится.

Представьте себе, что на конце водопроводной трубы в вашем доме был бы установлен простой газовый кран. Вы налили воды в чайник и спокойно поворачиваете кран...

Поток воды (плотность ρ) протяженностью, быть может, не одну сотню метров, с большой массой M, движущийся в трубе с немалой скоростью v, обладающий большим запасом энергии, равным $\frac{Mv^2}{2}$, остановился внезапно. Куда же исчезла его кинетическая энергия? Исчезнуть она не могла. Заторможенный поток может совершить за счет ее немалую работу. И он ее в этом случае обязательно совершит, да еще как!

Работа равна произведению силы на путь. Но вода почти несжимаема, трубы почти нерастяжимы. Поток остановлен внезапно. Путь, который может пройти вода в трубе после остановки за счет сжатия, ничтожно мал, близок к нулю. Следовательно, должны неминуемо возникнуть гигантские силы... и происходит неожиданная катастрофа: внезапно лопнули трубы, фонтаны воды заливают дом.

Это не выдуманная, а совершенно реальная картина. Она была обычной и причиняла много бед, пока великий русский ученый Н. Е. Жуковский, создавший теорию крыла самолета, не разработал (1898) количественную теорию, применение которой прекратило все катастрофы, вызывавшиеся таинственным гидравлическим ударом.

Теория Жуковского очень сложна, но приводит к простому результату.

Чтобы вычислить величину гидравлического удара, надо знать скорость c распространения ударной волны в жидкости. При мгновенной остановке потока давление около затвора повышается на $\Delta p = \rho c$ паскалей.

Нетрудно теперь понять, почему не нужны сложные завинчивающиеся краны на газовых линиях. Плотность газа мала, сжимаемость велика. При внезапной остановке газового потока хотя и может возникнуть повышение давления, но оно будет невелико и безопасно.

Явление гидравлического удара — это только частный пример неустановившегося движения сплошных сред.

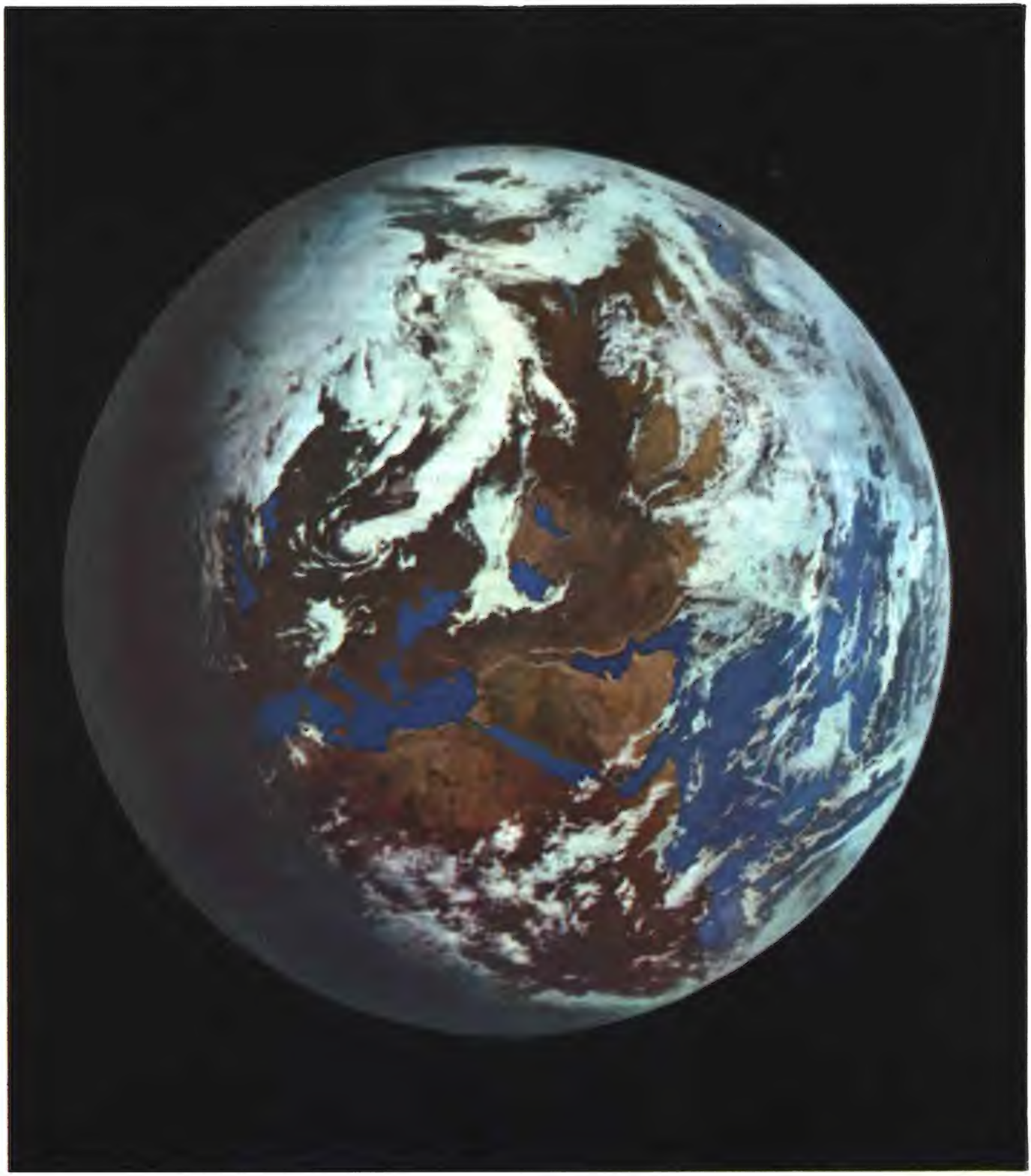
Общая теория этих процессов требует учета упругих свойств жидкости или газа. Она становится более сложной, так как приходится учитывать работу сжатия.

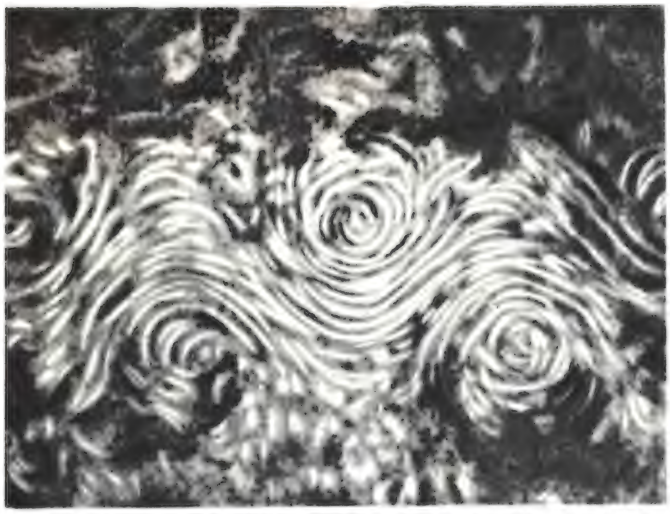
Вихри

Но значение замечательной области науки, с которой мы лишь вскользь познакомились, не ограничивается техникой.

Подобно тому как в вязком потоке, там, где у поверхности тела при его обтекании возникают очень высокие градиенты скоростей, появляются вдруг цепочки вихреобразных движений, очень сходные явления возникают и в природе в грандиозных мас-

зарождения и развития вечных течений в сплошной среде — в атмосфере нашей прекрасной планеты? Посмотрите, как прихотливы формы облачных потоков, несущих с дождями и грозами жизнь всему живому на Земле. Взгляните, там, где расположена наша столица Москва, в тот момент, когда был сделан этот снимок планеты из космоса, проходил гигантский вихрь — циклон. Бесспорно, это неплохая иллюстрация к статье, излагающей начала удивительной науки — механики сплошных сред.





Цепочка вихрей в потоке за цилиндром.

штабах. Водовороты, смерчи в пустынях и на море, торнадо, шквалы, циклоны и антициклоны в атмосфере, те чудовищные вихри на Солнце, что обычно называются просто пятнами, а может быть, даже и спиральные туманности в космосе — все эти необозримые и необъятные области явлений в мироздании, законы которых еще далеко не познаны, поразительным образом объединяются с тем, что мы наблюдаем в трубе, по которой течет вода. Все они не могут быть изучены без применения законов гидродинамики.

Возникает новая область гидродинамики, которая изучает, по каким законам энергия Солнца, падающая на нашу планету, превращается в энергию турбулентного движения — переходит от малых вихрей к более крупным и порождает в атмосфере Земли гигантские вихри — циклоны.

Физики начинают понимать, как это происходит. Создается механика глобальной общей циркуляции атмосферы с удивительным и непонятным допущением о существовании отрицательной турбулентной вязкости. Но еще никто не знает, почему это происходит.

Рождение смерчей остается загадкой.

Не надо думать, что для того, чтобы познакомиться с вихревыми движениями, придется отправиться в пустыню, плавать по океанам или идти в астрономическую обсерваторию. Это можно сделать гораздо проще: помешайте суп в тарелке, вслед за движением ложки возникнут вихри; откройте спуск в вашей ванне, и вы увидите красивую картину образования воронки вихревого стока. Не следует только пытаться знакомиться с вихревыми водоворотами, купаясь у плотины.

Неньютоновские жидкости

Все, что до сих пор было рассказано в этой статье, относилось к газам или жидкостям с определенной вязкостью. Но существует огромное множество замечательных и важных жидких систем, к которым просто неприложимо понятие вязкости в том виде, в каком его установил Ньютон.

Комок сырой глины твердый, он сохраняет свою форму, а под нагрузкой глина пластична — течет. Студень на тарелке упругий и, значит, твердый, а при деформации становится жидким. А тесто твердое? Нет. Жидкое? Тоже нет. Какое оно? А знать это надо. Иначе не построишь хороших машин для хлебозаводов. Каковы свойства еще не затвердевшего бетона? А каковы свойства варенья, томатного, яблочного пюре? Каковы свойства нашей крови, растворов полимерных веществ, смазочных материалов, самых разных суспензий и эмульсий, нефти? По каким законам нефть движется под землей к буровой скважине? По каким законам она транспортируется по нефтепроводам на тысячи километров?

Все эти важные вопросы, относящиеся к веществам с аномальной вязкостью, со структурной вязкостью, к веществам, которые принято называть неньютоновскими, решаются теперь новой наукой, разделом общей механики и физики сплошных сред — *реологией*, наукой о пластичных свойствах вещества, о его текучести. Ведению реологии подлежат и движение крови в нашем организме, и работа смазочных масел в подшипниках быстроходных машин, и образование пластов горных пород в течение миллионов лет.

Задачи будущего

Из этой статьи вы, конечно, еще только лишь узнали, что существует большая область механики — *механика сплошной среды*, изучающая законы движения в сплошной вязкой среде. В этой науке много разделов: гидростатика, гидравлика, гидродинамика, аэродинамика, газодинамика, аэрогидродинамика, реология... В этой науке еще много таинственного и загадочного, в ней не решены многие, казалось бы самые простые, вопросы. Например, не решен еще до конца даже самый простой из них, сформулированный в заглавии статьи. Но в то же время эта наука помогает решать очень трудные и важные проблемы новой техники наших дней.

Уже возникают новые, огромной важности задачи, требующие дальнейшего развития механики сплошных сред. Их решение совершенно необходимо:

должна быть создана теория обтекания тел такими газовыми и жидкостными потоками, в которых протекают химические реакции. Это необходимо для химии, чтобы рассчитывать и строить химические реакторы огромной мощности;

необходима теория потоков, в которых совершаются фазовые превращения. Без нее нельзя строить сверхмощные экономичные паровые турбины. Конденсирующиеся из пара капли жидкой воды могут разрушить лопатки турбины и вызвать катастрофу;

теория взлета космических кораблей требует развития методов расчета потоков, в которых возможна ионизация газов и возникают гигантские температурные скачки, разрушающие поверхность тела.

Очень важно уметь точно и задолго вперед предсказывать погоду, а для этого нужно знать, по каким законам происходит движение воздушных масс в атмосфере Земли и морских течений в океане. Наука встает перед загадкой существования поразительных процессов — большой области явлений с отрицательной вязкостью. Они еще далеко не изучены и не разгаданы, но, бесспорно, такие процессы играют важную роль в земной атмосфере, а знание их необходимо и для того, чтобы понять, как образуются во Вселенной спиральные галактики.

Совсем недавно родилась новая область науки — *физика плазмы* — среды, состоящей из заряженных частиц, из ионизированного газа (обычно при высокой температуре). Примеры плазмы: пламя, раскаленные газы, состояние вещества в звездах. Физика плазмы является теоретическим фундаментом для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза. Путь к решению этой проблемы намечен в работах выдающегося советского физика Л. А. Арцимовича. Возникает новая отрасль химии — *плазмохимия*, изучающая недоступные ранее химические процессы при очень высокой температуре, превышающей десять тысяч кельвинов.

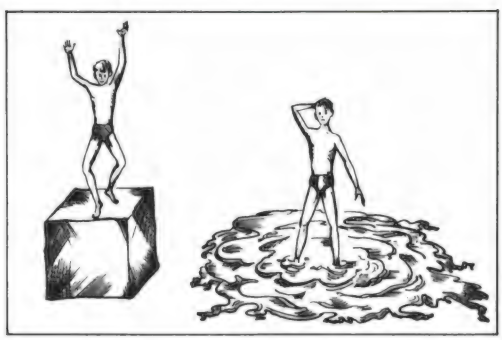
Очень важные, очень интересные и очень нужные явления возникают при воздействии на плазму магнитных полей. Появляется принципиальная возможность прямого превращения с очень большим коэффициентом полезного действия химической энергии горения топлива в электроэнергию.

Эти гигантские задачи требуют новых методов расчета. Уже возникает новая наука — *магнитогидродинамика* с необъятными возможностями, но и с очень большими трудностями.

Очень много работы у этой прекрасной, увлекательной, самой простой и самой сложной, самой древней и самой молодой, самой обыденной и повседневной и самой таинственной и загадочной науки — механики сплошных сред.

Вот так глина!

В природе изредка встречаются совершенно удивительные виды осадочных пород. На севере нашей страны и в Скандинавии известны особые глинистые отложения. В обычном состоянии эти твердые прочные породы ничем не отличаются от хорошо всем известных плотных глин. Но эти породы обладают поразительной способностью изменять свои свойства, когда нарушается их структура. При достаточно сильном механическом воздействии эти сухие твердые породы без малейшего добавления воды внезапно переходят в жидкое состояние. Неожиданно возникающие огромные оползни приводят к катастрофическим разрушениям и человеческим жертвам. Это странное и еще недостаточно изученное явление относится к обширной области новой науки — физико-химической механике, которая была основана замечательным советским ученым академиком П. А. Ребиндером (см. ст. «Замечательные явления на границе между телами»).



Звук

С точки зрения физики звук — это колебания в какой-либо упругой среде: воздухе, воде, земной коре. Космос — безвоздушная среда, там нечему колебаться, поэтому и нет звука. Зато глубины рек и морей обильно насыщены звуками. Существа, живущие в воде, вопреки поговорке «нем как рыба», вовсе не немы и не глухи. Распространяются звуки и в земных толщах. Улавливая их, сейсмологи за сотни и тысячи километров изучают землетрясения.

Излучают звук вибрирующие тела: струны, камертоны, голосовые связки. Если какое-то тело очень медленно перемещается в воздухе, то воздух просто обтекает его. Но если тело колеблется быстро, оно своим движением то сжимает, то разрежает воздух, то повышает, то снижает его давление. Слои повышенного и пониженного давления разбегаются друг за другом в воздухе во все стороны от колеблющегося тела и образуют *звуковую волну*. Расстояние между соседними максимумами (или минимумами) давления называется *длиной звуковой волны*. Ее обычно обозначают буквой λ (ламбда). Если колебания тела, создающие звуковую волну, следуют друг за другом не реже чем 16 и не чаще чем 20 000 раз в секунду, наше ухо воспринимает их. Физическая величина, определяемая числом колебаний в единицу времени, называется *частотой*. Измеряется частота в герцах (по имени немецкого ученого Генриха Герца). 1 Гц — частота, при которой за время 1 с происходит одно колебание, 2 Гц — два колебания в секунду и т. д.

Звуковые колебания малой частоты ощущаются как низкие, басистые тоны, большой — как высокие, писклявые. Когда над ухом зудит комар, вы слышите звук частотой около 10 000 Гц (длина звуковой волны равна приблизительно 3,3 см). А в мычании быка нет звуков с частотой больше 30 Гц, и длина волны такого звука примерно 10 м.

Неслышимые акустические волны с частотами меньше 16 Гц — инфразвуки, а выше 20 кГц — ультразвуки могут быть обнаружены только приборами.

Как измеряли скорость звука

Мысль измерить скорость звука впервые пришла английскому философу Фрэнсису Бэкону. По его совету этим занялся французский ученый Марен Мерсенн. В 1630 г. он провел наблюдение над выстрелом из мушкета. Расстояние между наблюдателем и мушкетом было поделено на время, прошедшее между вспышкой от выстрела и долетевшим до наблюдателя звуком. Мерсенн нашел, что скорость звука равна 230 туазам в секунду, что соответствует 448 м/с.

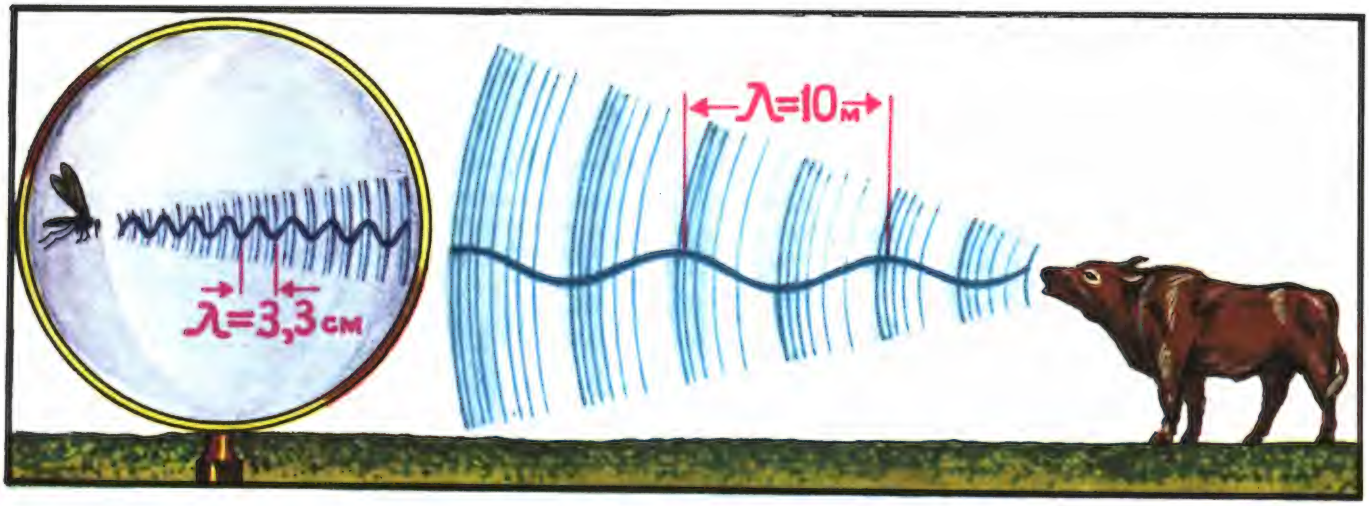
Спустя полвека Ньютон вычислил скорость звука теоретически, исходя из упругих свойств воздуха и зависимости удельного объема газа от давления при постоянной температуре, зависимости, выраженной законом Бойля — Мариотта. Эта скорость оказалась немногим более половины скорости, полученной в опыте Мерсенна. Ошибку начали искать в теоретических рассуждениях Ньютона и в опыте Мерсенна.

В 1738 г. Парижская академия наук повторила измерение скорости звука. Опыт был поставлен на холме Монмартр, близ Парижа. Было установлено, что скорость звука равна 171 туазу в секунду, что соответствует 337 м/с. Несовпадение с опытом Мерсенна объяснили тем, что его измерение времени было несовершенным. Однако и результат повторного опыта не соответствовал теоретической формуле Ньютона.

В начале XIX в. выяснилось, что расчет Ньютона был неверен. Ньютон предполагал, что распространение звука происходит в изотермических условиях, т. е. при постоянной температуре. Но в действительности этих условий в звуковой волне нет. Теплопроводность воздуха мала, а расстояние между слоями сжатия и разрежения велико. Избыток тепла из слоя сжатия не успевает перейти в слой разрежения, температура между ними не успевает выровняться. Давление и удельный объем изменяются, следовательно, при изменяющейся температуре. Физические процессы, происходящие без теплообмена с окружающей средой, называются *адиабатическими*.

В адиабатическом процессе сжимаемый газ нагревается (вспомните, как нагревается велосипедный насос, если быстро накачивать шину), а расширяющийся — охлаждается. Различие между расширениями газа в изотермических и адиабатических условиях позволило французскому ученому Пьеру Лапласу объяснить, почему скорость звука, вычисленная по формуле Ньютона, не совпадает с результатом опыта: колебания звукового давления в воздухе происходят в адиабатических, а не в изотермических условиях, т. е. сопровождаются изменениями не только давления и плотности, но и температуры.

В 1822 г. близ Парижа вновь были поставлены опыты. В них участвовали ученые Ж. Гей-Люссак, Д. Араго, А. Гумбольдт и другие. Результаты опыта совпали с теоретическими вычислениями Лапласа и подтвердили, что скорость звука возрастает с повышением температуры. В сухом воздухе при 0° С она равна 331,5 м/с, а при 20° С — 344 м/с.



Длина волны в комарином писке в 330 раз короче, чем в мычании быка.

Оба колокольчика излучают звуковые волны с одинаковой частотой. Длина волны больше в той среде, где она распространяется с большей скоростью.

При одной и той же температуре скорость звука больше в том газе, у которого меньше молекулярная масса. При 0° С скорость звука:

в водороде	—	1284 м/с
в гелии	—	965 м/с
в азоте	—	334 м/с
в кислороде	—	316 м/с

В воде, упругость которой больше, чем воздуха, звук распространяется со скоростью примерно 1500 м/с. Упругость твердых тел больше, чем жидкости, и скорость звука в них еще выше: в алюминии скорость звука равна 6400 м/с, в стекле — 4300 м/с, в кристалле сапфира — 11 400 м/с.

Звуки разной частоты распространяются в воздухе с одной и той же скоростью. Если бы это было не так, мы не могли бы, например, слушать музыку в исполнении оркестра: звуки, созданные разными инструментами, обгоняли бы друг друга и вместо слаженного звучания оркестра мы слышали бы безобразный шум.

Распространение и отражение звука

Зная частоту ν и скорость звука v, нетрудно вычислить длину звуковой волны λ. Связь этих величин выражается формулой: $\lambda = \frac{v}{\nu}$.

Понятие длины волны поможет нам объяснить тот факт, что от звука нельзя загородиться небольшим листом картона, как от пучка света: звуковые

волны способны огибать препятствия, «не замечать» их, если их размеры меньше, чем длина волны. Длина слышимых в воздухе звуковых волн колеблется от 1,5 см до 15 м. Если у препятствий на их пути размеры меньше (например, у древесных стволов в редколесье), то волны их просто огибают. Препятствия же больших размеров (стена дома, скала) отражают звуковые волны по тому же закону, что и световые: угол падения равен углу отражения. Эхо — это отражение звука от препятствий.

Своеобразно переходит звук из одной среды в другую. Явление это довольно сложное, но оно подчиняется общему правилу: звук не переходит из одной среды в другую, если их плотности резко отличны, например из воздуха в воду. Достигнув границы этих сред, он почти полностью отражается. Очень незначительная часть его энергии уходит на вибрацию поверхностных слоев другой среды. Под самой поверхностью воды еще слышны громкие звуки, но на глубине одного метра уже ничего не слышно. Рыбы не слышат звука, раздающегося над поверхностью моря, но звук от тела, вибрирующего в воде, они отлично воспринимают.

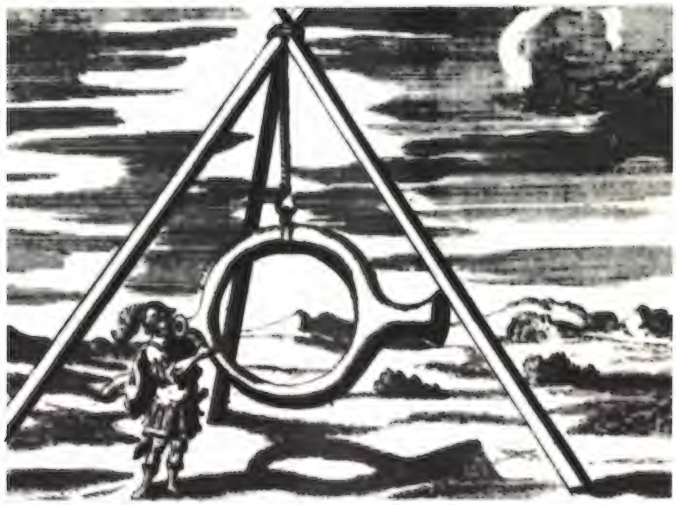
Через тонкие упругие стенки звук слышен хорошо: стены колеблются и воспроизводят звуковые волны в соседней комнате. Хорошие звукоизоляционные материалы — вата, ворсистые ковры, пенобетон или пористая сухая штукатурка. В них очень много поверхностей раздела между воздухом и твердым телом. Проходя через каждую из таких поверхностей, звук многократно отражается и поглощается. По сходной причине один и тот же звук слышен лучше и дальше в чистом воздухе, чем в тумане.

По-разному поглощаются в воздухе звуковые волны различной частоты: сильнее — звуки высокие, меньше — низкие. Поэтому пароходный гудок настраивают на низкий тон (частотой не более 50 Гц). Большой колокол в Московском Кремле, когда он еще находился на колокольне «Иван Великий», был слышен за 30 км (частота примерно 30 Гц). Еще меньше поглощаются инфразвуки, особенно в воде. Рыбы слышат их за десятки и сотни километров. А вот ультразвук поглощается очень быстро: ультразвук с частотой 1 МГц ослабляется в воздухе вдвое на расстоянии 2 см, тогда как звук с частотой 10 кГц ослабляется вдвое на расстоянии 2200 м.

Звуки любой частоты распространяются в воде дальше, чем в воздухе, а в твердых телах еще дальше.

Приложив ухо к железнодорожному рельсу, можно услышать шум далеко идущего поезда, когда по воздуху этот шум еще совсем не слышен.

Рупор полководца.



Звуковая энергия

Хаотическое движение частиц вещества (в том числе и молекул воздуха) называют *тепловым*. Когда в воздухе распространяется звуковая волна, его частицы приобретают кроме теплового еще и дополнительное движение — колебательное. Энергию для такого движения дает частицам воздуха вибрирующее тело (источник звука); пока оно колеблется, энергия беспрерывно передается от него в окружающий воздух. Чем дальше пройдет звуковая волна, тем слабее она становится, тем меньше в ней энергии. То же самое происходит со звуковой волной и в любой другой упругой среде — в жидкости, в металле.

Когда на пути звука нет препятствий, он распространяется равномерно во все стороны, и в каждый момент слой сжатого воздуха, возникший от одного импульса, образует поверхность шара, в центре которого находится звучащее тело. Радиус такого шара непрерывно растет. Один и тот же поток звуковой энергии приходится на все большую и большую площадь сферической поверхности. Уменьшается интенсивность звука, т. е. отношение потока звуковой энергии к площади поверхности, перпендикулярной направлению звука. На расстоянии звук становится слабее, но давно придуманы устройства, позволяющие слышать голос на далеком расстоянии. Самое простое — рупор. Он создает направленную звуковую волну так, что поток ее энергии концентрируется в одном направлении. Еще Александр Македонский пользовался во время сражений рупором.

Русский ученый Н. А. Умов ввел в науку понятие потока плотности энергии. Понятием потока звуковой энергии пользуются при измерениях интенсивности звука. Интенсивность звука в звуковой волне определяется звуковой энергией, которая проходит в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению волны. Чем больше поток звуковой энергии, тем больше интенсивность звука. Измеряется поток звуковой энергии в ваттах (Вт), а интенсивность звука — в ваттах на квадратный метр (Вт/м^2).

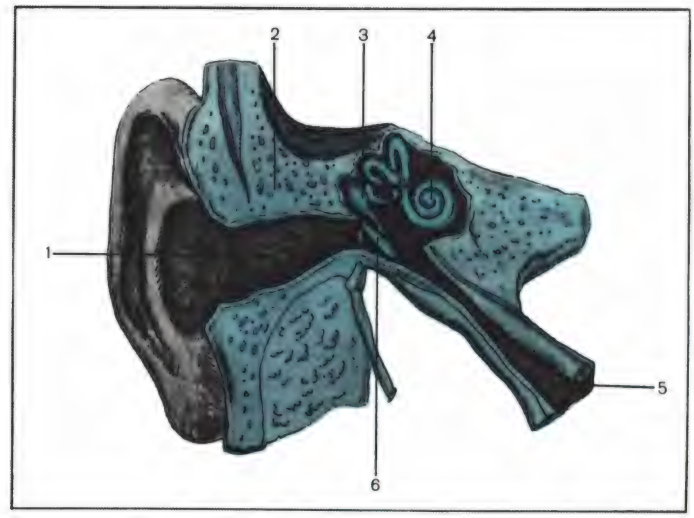
Представьте себе стадион, где одновременно говорят и кричат 100 000 человек. Если превратить энергию этих голосов в энергию электрическую, то ее едва хватит на лампочку маленького электрического фонарика. Мощность одновременного разговора всех людей на земном шаре едва ли больше мощности автомобиля «Москвич». Ведь интенсивность звука громкого человеческого голоса всего лишь 10 мкВт/м^2. Существуют мощные излучатели ультразвука, интенсивность которых достигает 1 МВт/м^2.

Наше ухо

В органе слуха различают наружное, среднее и внутреннее ухо. Наружное ухо — это ушная раковина и начало слухового прохода до барабанной перепонки. За ней — область среднего уха: полость, заполненная воздухом, и три слуховые косточки. Первая из них, молоточек, одним концом сочленена с барабанной перепонкой, другим со второй косточкой — наковальней. Наковальня соединена с третьей косточкой — стременем, которое упирается в перепонку, отделяющую среднее ухо от внутреннего. Молоточек, наковальня и стремя — это своеобразный рычажный механизм, передающий колебания барабанной перепонки во внутреннее ухо. Внутреннее ухо (лабиринт) — это полость, свернутая улиткой и наполненная жидкостью. Внутри лабиринта есть мембрана, соприкасающаяся со слуховыми нервами.

При тишине давление воздуха с обеих сторон барабанной перепонки одинаково и она находится в состоянии покоя. Когда же в наружном ухе давление воздуха увеличивается, барабанная перепонка прогибается внутрь. При этом воздух, находящийся в среднем ухе, сжимается. Если давление воздуха в наружном ухе уменьшается, упругий воздух в среднем ухе прогибает барабанную перепонку в область наружного уха.

Органы слухового аппарата человека: *1* — наружный слуховой проход; *2* — височная кость; *3* — наковальня, молоточек, стремя; *4* — улитка; *5* — евстахиева труба; *6* — барабанная перепонка.



Любое периодическое изменение акустического давления в пределах от 16 Гц до 20 кГц приводит к периодическим колебаниям барабанной перепонки. Ее колебания передаются молоточку, наковальне и стремени. Стремя передает колебания перепонке, отделяющей внутреннее ухо от среднего. В жидкости лабиринта возникают упругие волны — они приводят в движение мембрану улитки. Мембрана соприкасается с кончиками нервных корешков, которые передают раздражение в мозг. Эти раздражения фиксируются мозгом как звук.

Загадки нашего слуха

Звуковые волны оказывают переменное давление на предмет, стоящий на их пути. Благодаря звуковому давлению мы и слышим звук, причем величины этого давления могут быть ничтожны, человек легко улавливает шорох, звуковое давление которого на барабанную перепонку уха в тридцать миллиардов раз меньше атмосферного давления.

Наше ухо чувствительнее, чем точнейшие химические весы!

Такая высокая чувствительность загадочна. Вычислено, что самый слабый звук прогибает барабанную перепонку на расстояние меньшее, чем ... размеры атома! Науке еще не вполне ясно, как осуществляется в нашем ухе передача и восприятие столь слабых звуков.

Не менее удивительна способность уха безболезненно воспринимать звуки, интенсивность которых

Диаграмма слышимости звуков. ***Слева*** **— полный спектр звуков, которые может слышать человек.** ***Внизу*** **— в четырех диаграммах этот спектр разделен на отдельные области:** ***а*** **— область речи;** ***б*** **— область музыки;** ***в*** **— область слышимых шумов;** ***г*** **— область шумов, причиняющих органу слуха боль, и звуков неслышимых. Стрелками показаны в диаграммах места определенных звуков.**

Тысячи лет назад строили театры, учитывая требования архитектурной акустики. Афины. Разрушенный цирк в Акрополе.

различается в 10^{13} раз! Сон усталой матери, заснувшей возле ребенка, не могут нарушить раскаты грома. Но она сразу проснется в тревоге, чуть только изменится дыхание ребенка. На фоне чудовищных раскатов сильной грозы чуткое ухо матери улавливает ничтожные изменения в еле слышных звуках детского дыхания.

Наше ухо без вреда может переносить звуки огромной интенсивности, вплоть до 10 Вт/м^2. Звуки большей интенсивности непереносимы — они вызывают ощущение невыносимой боли. А интенсивность самого слабого звука, который еще могут воспринимать люди с особо острым слухом, поразительно ничтожна: всего 1пВт/м^2(10^{-12} Вт/м^2).

Каким образом наше ухо может определять звуки, различающиеся по интенсивности в 10^{13} раз, пока еще полностью не выяснено. Это удивительное свойство нашего уха. Современная измерительная техника не знает такого прибора, которым можно было бы измерять величины, различающиеся в десять биллионов раз. Если бы были созданы весы с таким же диапазоном измерений, то на них можно было бы взвесить и яблоко и небольшую планету.

Что такое громкость

Зависимость между интенсивностью звука и тем ощущением громкости, которое он производит, установлена опытным путем. При этом выяснилось, что громкость звука изменяется на единицу, когда его интенсивность увеличивается или уменьшается в 10 раз. Таким образом, громкость звука, ощущаемая нашим ухом, пропорциональна логарифму его энергии. Единица громкости — *бел* (Б). Однако для практических оценок громкости звука оказалось удобнее пользоваться десятой частью этой единицы — *децибелом* (дБ).

Если интенсивность первоначального звука I возрастет в 10 раз, т. е. окажется равной 10 I, то громкость воспринимаемого звука увеличится на 10 дБ; интенсивность вырастет в 100 раз, громкость повысится на 20 дБ; в 1000 раз — на 30 дБ. Всему необъятному диапазону (10 биллионов раз) в изменениях интенсивности звука, который доступен нашему уху, соответствует изменение в ощущении громкости всего на 130 дБ. Чем больше интенсивность звука, тем громче звук.

Началом отсчета принята интенсивность самого слабого звука, называемого *порогом слышимости:* $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2. (Такой слабый звук могут услышать только немногие люди, обладающие особенно острым слухом.) Тогда громкость любого звука, имеющего интенсивность I, составит $10 \lg \frac{I}{I_0}$ дБ. Вот несколько примеров громкости знакомых всем звуков и соответствующая им интенсивность звука:

шелест листьев	—	10 дБ	— 10^{-11} Вт/м^2
тиканье часов	—	20 дБ	— 10^{-10} Вт/м^2
мирная беседа	—	40 дБ	— 10^{-8} Вт/м^2
громкий разговор	—	70 дБ	— 10^{-5} Вт/м^2
шумная улица	—	90 дБ	— 10^{-3} Вт/м^2
самолет на старте	—	100 дБ	— 10^{-2} Вт/м^2

Как видим, громкий разговор действует на наши уши с интенсивностью звука в 1000 раз большей, чем мирная беседа.

Низкие и высокие тоны воспринимаются на пороге слышимости по-разному. Чтобы у них была одинаковая громкость, энергия и давление звука должны быть у низких тонов больше, чем у высоких. Наконец, тембр, окраска звука, определяется соотношением высоких и низких звуковых частот, воспринимаемых ухом от одного звукового источника, а также соотношением их энергий и звуковых давлений.

Откуда пришел звук?

Услышав голос, вы повернете лицо именно в ту сторону, откуда он донесся. Происходит это потому, что слуховые раздражения приходят в мозг одновременно от обоих ушей только в том случае, если источник звука находится от них на равном расстоянии. Голову мы поворачиваем всегда в ту сторону, откуда звуковое раздражение пришло в мозг хотя бы на одну десятитысячную долю секунды раньше, чем раздражение, воспринятое другим ухом.

Эта способность человека (и животных) определять источник звука называется *бинауральным эффектом*. Его часто используют в технике, например для стереофонического звучания в кино. При демонстрации стереофонически озвученных фильмов звуки производятся двумя или несколькими динамиками в различных точках кинозала. По такому же принципу устроены проигрыватели для стереофонических граммофонных пластинок.

Движение звуковых источников

Вы, наверное, замечали, как изменяется звук сирены электропоезда, проносящегося мимо платформы, на которой вы стоите. Когда поезд приближается, тон сирены выше, а когда он удаляется — ниже. Почему это происходит? Ведь сирена все время дает одинаковое количество колебаний. Дело в том, что она движется. Поэтому, когда сирена приближается к вашему уху, ее скорость добавляется к скорости посланных ею же звуковых волн и в ухо они приходят чаще. А когда сирена удаляется от вас, скорость ее вычитается из скорости звуковых волн и к неподвижному наблюдателю они приходят реже. Такое изменение частоты или длины волны при движении их источника называют *эффектом Доплера*. Эффект Доплера наблюдается для любых волн — не только звука, но и света и радиоволн.

А что будет, если источник звука летит на вас со скоростью звука или даже быстрее, чем звук?

Реактивный самолет обгоняет свой звук. Сначала вы увидите летящий низко самолет, а затем уже, когда самолет скроется, вы услышите звук более низкий, чем тот, который можно услышать на аэродроме при старте. Все звуковые колебания воздуха должны оставаться сзади самолета, в конусе, угол которого тем меньше, чем скорость самолета больше скорости звука.

Но самолет — источник очень сильных возмущений. При полете со сверхзвуковой скоростью воздух перед ним уплотняется — там резко возрастают и давление и температура. Этот слой удается сфотографировать, настолько в нем отличны и плотность, и коэффициент преломления от обычного воздуха. Скорость звука в таком слое становится несколько больше обычной. Но самолет обгоняет звук, возникает так называемая *ударная волна*. Она не может опередить летящий сверхзвуковой самолет, отстает от него и распространяется только в стороны, но не вперед. Энергия ударной волны поэтому почти не уменьшается, и звук ее подобен удару грома. Иногда в безоблачный день вы его слышите. С удивлением ищете в небе грозовое облако, но, приглядевшись, видите вместо него серебристую точку... Это скоростной самолет, а удар «грома» — это его ударная волна.

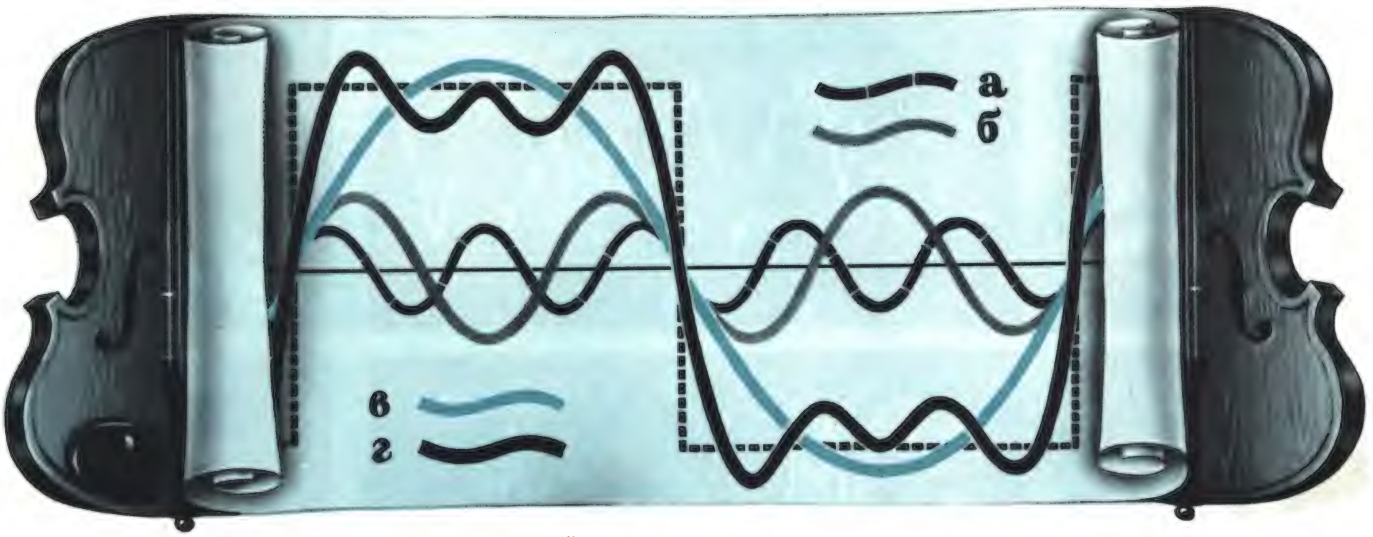
Резонаторы

Чтобы раскачать качели, надо их подталкивать в такт их движению. Если толкать как попало, не в такт,— сильно раскачать не удастся. То же самое происходит с любыми колебаниями, например со звуковыми волнами, с волнами на воде.

Неподалеку друг от друга поставлены два камертона одинаковой частоты. Если один из камертонов заставить звучать, его звуковая волна раскачает и другой камертон. Прекратив звучание первого камертона, вы можете услышать, что второй некоторое время продолжает звучать. Но камертон другой частоты не отзовется на звучание первого, не будет резонировать.

Дека рояля, корпус скрипки, раструб валторны,

У гармонических колебаний *а, б* и *в* различные амплитуды, а их частоты относятся, как 1 : 3 : 5. При одновременном звучании они слагаются и образуют сложное периодическое колебание *г*.



радиорупор — все это резонаторы. Звук одной только скрипичной струны не будет слышен в концертном зале, но его во много раз усиливает резонатор — корпус скрипки. Кроме того, резонаторы музыкальных инструментов придают звуку своеобразные тембры. Как резонатор действует и сам концертный зал.

Существует специальный раздел акустики — архитектурная акустика, или акустика помещений, занимающаяся проектированием концертных, лекционных, театральных и других залов с хорошими условиями слышимости. Звуковые волны в помещении многократно отражаются от стен и предметов, находящихся в помещении, и могут мешать восприятию звука от основного источника. Когда источник прекращает излучать звук, то звуковые волны еще продолжают некоторое время блуждать по помещению, постепенно затухая. Это затухание называется *реверберацией*. Время реверберации определяет качество акустики помещения. При очень большом времени реверберации зал становится гулким, отраженные звуки накладываются друг на друга и делают основной звук неразборчивым. Если время реверберации слишком мало, тоже плохо, звуки получаются глухими, музыка теряет свою выразительность.

Есть еще и строительная акустика, занимающаяся разработкой звукоизолирующих и звукопоглощающих материалов для защиты помещений от наружных, уличных шумов и шумов, создаваемых в соседних помещениях.

Борьба с шумами — это серьезный вопрос. Даже если мы чем-то заняты, например читаем интересную книгу и не замечаем посторонних шумов, они незаметно воздействуют на нашу нервную систему и вызывают чувство усталости.

Музыкальные звуки

В науке *музыкальным* называется тот звук, в котором изменение акустического давления, воспринимаемого ухом, упорядочено и повторяется регулярно, через равные промежутки времени. Звук перестает быть музыкальным, и его называют *шумом*, если звуковое давление изменяется беспорядочно.

Всякое вибрирующее тело создает одновременно звуки нескольких тонов или частот и при этом различной интенсивности. Самый низкий из них называют *основным тоном*; более высокие тоны, сопровождающие основной,— *обертонами*. В совместном звучании основной тон и обертоны создают *тембр звука*. Каждому музыкальному инструменту, каждому человеческому голосу присущ свой тембр. Один тембр отличается от другого числом и силой обертонов. Чем больше их в звучании основного тона, тем приятнее тембр звука.

Ухо человека способно анализировать звук, т. е. разбираться в совокупности тонов и обертонов, и это позволяет ему отличать один тембр от другого.

Если высокие обертоны преобладают в человеческом голосе над низкими, говорят, что в голосе «слышится звучание металла». Когда же преобладают низкие обертоны, голос называют мягким, бархатистым. При этом нельзя упускать из виду, что восприятие голоса слухом зависит не только от частоты колебаний и интенсивности звука, не только от тонов и обертонов, но и от чувствительности уха к тонам различной высоты.

Человеческий голос — это сложное колебание, состоящее из многих простых колебаний различного тона и громкости:

А — гласная «а», произнесенная мужским голосом, основная частота — 200 колебаний в секунду; *И* — гласная «и», высокий голос девочки, основная частота — 350 колебаний в секунду; *С* — так построена волна «беззвучной» согласной «с», ее частота — около 6000 колебаний в секунду.

Созвучие — это одновременное звучание нескольких музыкальных тонов. Отношение частот колебаний двух тонов называют интервалом. Если отношение равно 1 : 1, интервал называют *унисоном*. Отношение 1 : 2 — *октава*, 2 : 3 — *квинта*, 3 : 4 — *кварта*, 4 : 5 — *большая терция*, 5 : 6 — *малая терция*.

Если частоты двух тонов очень мало отличаются друг от друга, их совместное звучание создает своеобразное завывание — биения: совместное звучание периодически то усиливается, то ослабляется. Количество усилений в одну секунду называют *частотой биений*. Если частота биений не больше четырех в секунду, они не мешают слуховому восприятию. Если же частота достигает тридцати (и особенно тридцати трех), звуковое ощущение нестерпимо. Однако при большой частоте (около 130 Гц) влияние биений на слуховые ощущения исчезает.

При звучании струн скрипки, виолончели, рояля всегда слышны кроме основного тона дополнительные призвуки — обертоны. Предположим, что одновременно звучат две струны, их основные частоты — 200 и 400 Гц и у каждой струны 5 обертонов.

У первой струны:

основной тон	— 200 Гц
первый обертон	— 400 Гц
второй обертон	— 600 Гц
третий обертон	— 800 Гц
четвертый обертон	— 1000 Гц
пятый обертон	— 1200 Гц

У второй струны:

основной тон	— 400 Гц
первый обертон	— 800 Гц
второй обертон	— 1200 Гц

Одна и та же нота — *до* первой октавы — звучит на разных музыкальных инструментах по-разному. Различие зависит от тембра, который придается ноте инструментом. На рисунках (*сверху вниз*): так волна этой ноты выглядит, когда ее воспроизводят на кларнете; та же нота, воспроизведенная на пианино; *до* первой октавы на скрипке.

третий обертон — 1600 Гц
четвертый обертон — 2000 Гц
пятый обертон — 2400 Гц

Отношение частот у основных тонов равно 1 : 2, т. е. октаве. При совместном звучании обеих струн три тона у них совпадают: 400, 800 и 1200 Гц. Чем больше в совместном звучании одинаковых тонов, тем больше сродства в созвучии струн. В этом случае биений нет, созвучие называют *консонансом*.

Если вторую струну заменить третьей, у которой:

основной тон — 410 Гц
первый обертон — 820 Гц
второй обертон — 1230 Гц
третий обертон — 1640 Гц
четвертый обертон — 2050 Гц
пятый обертон — 2460 Гц,

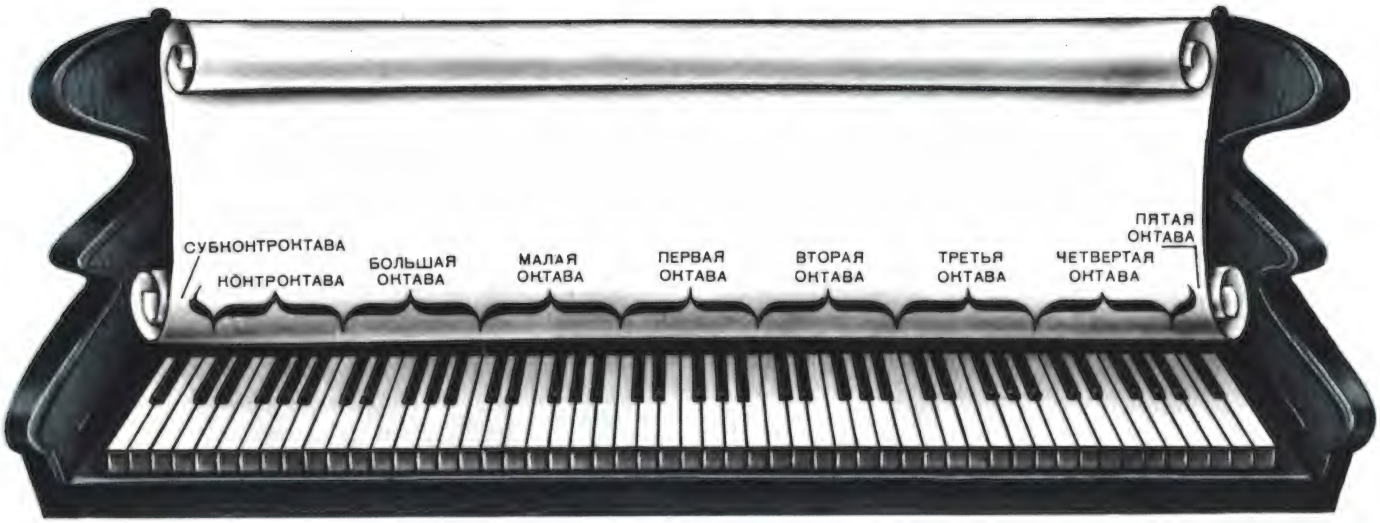
то совместные звучания первой и третьей струн будут давать биения: 400 и 410 Гц, 800 и 820 Гц, 1200 и 1230 Гц. Частоты биений равны разности частот колебаний двух струн, т. е. 10, 20 и 30 Гц. Октава разрушена, и получился диссонанс.

Интервалы, которые дают лучшие консонансы, образуют последовательности музыкальных звуков — *гаммы*, где отношение частот строго определенно. Существует много разновидностей гамм. У большинства из них отношение соседних частот составляет арифметическую пропорцию. Например, мажорная, или диатоническая, гамма включает тоны, частоты которых относятся, как

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8}$$

На практике рассчитывают тоны мажорной гаммы по частоте колебаний *ля* первой октавы — 440 Гц.

Клавиатура фортепьяно.



Фонограф Эдисона *(внизу)*.

Передача и запись звуков

Наиболее простой способ передачи звуков — *телефон*. Его изобрел в 1876 г. американский физик А. Белл.

Изобретатель намотал изолированную проволоку на железный сердечник, поднес к такой катушке камертон и обнаружил, что в проволоке возникает переменный ток. Это происходит потому, что колеблющаяся ножка камертона изменяет магнитное поле сердечника. Белл соединил концы обмоток у двух катушек и установил на обоих сердечниках по камертону. Когда один из камертонов звучал — вибрировал и возбуждал в своей катушке ток, намагничивался сердечник и в другой катушке, а изменения силы тока во втором сердечнике заставляли звучать и второй камертон. Звук первого камертона передавался второму.

Вначале прибор Белла воспроизводил звуки очень неясно. Но когда камертоны были заменены металлическими пластинками, удалось передать на расстояние человеческий голос. Прием получался, правда, слабый и искаженный. В телефоне Белла для передачи звука использовалась энергия самого человеческого голоса, а она, как известно, чрезвычайно мала.

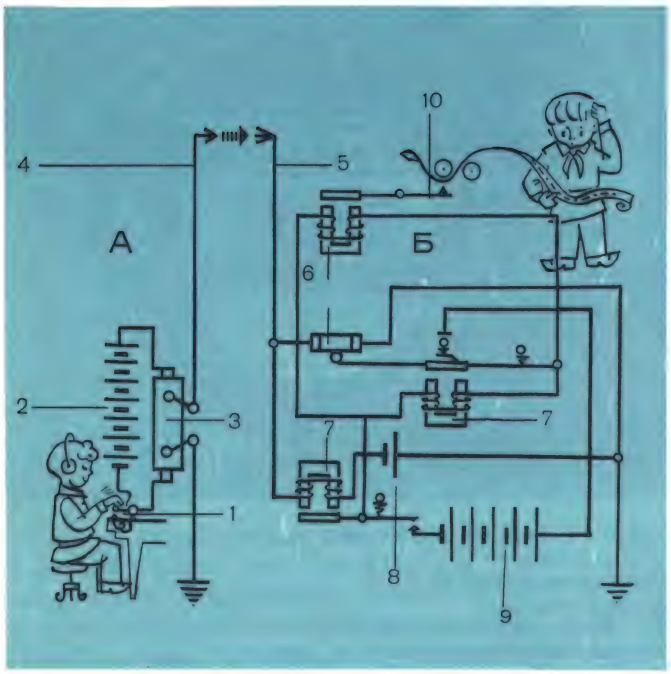
Этот недостаток устранил микрофон, изобретенный Давидом Юзом. В нем угольный стерженек касался заостренными концами угольных же чашечек. Звуковые волны изменяли плотность контакта между концами стерженька и чашечками. В цепь телефона и микрофона Юза включена батарея. Колебания человеческого голоса то увеличивают, то уменьшают сопротивление угольного стерженька, причем точно в такт со звуковыми колебаниями. И этот пульсирующий ток, пройдя далекие расстояния, попадал в катушку телефона, заставлял там в такт с колебаниями голоса вибрировать мембрану, воспроизводящую передаваемый звук.

Почти таким же осталось и до сих пор устройство внутригородского телефона. В междугородной же телефонной сети используют усилители.

Гигантским шагом вперед было изобретение передачи звуков с помощью радиоволн. Первым использовал эти волны для связи А. С. Попов.

Почти одновременно с изобретением радиосвязи были найдены способы записи и воспроизведения

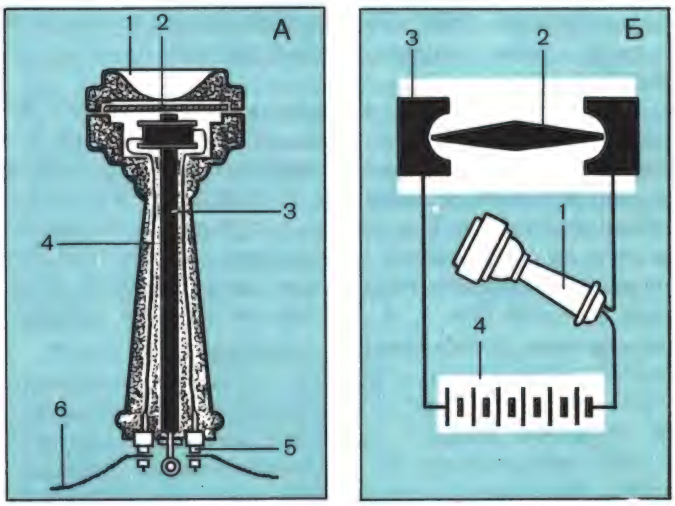
Схема первой радиопередачи, предложенная А. С. Поповым.
А — передатчик:
1 — ключ; *2* — батарея; *3* — источник переменного напряжения;
4 — передающая антенна.
Б — приемник:
5 — приемная антенна;
6 — когерер;
7 — электромагнит;
8 — элемент;
9 — батарея;
10 — телеграфный аппарат.



Лев Николаевич Толстой у фонографа.

Слева. Первый телефон Белла.

Справа. Первые усовершенствования телефона.
А — телефонная трубка Белла:
1 — слуховая раковина (амбушюр);
2 — мембрана;
3 — постоянный магнит;
4 — проводник;
5 — зажим;
6 — линейный провод.
Б — микрофон Юза:
1 — телефонная трубка Белла; *2* — угольный стержень; *3* — угольные колодочки; *4* — батарея.



звука. Их открыл знаменитый американский изобретатель Томас Эдисон. Как же был устроен фонограф Эдисона?

На тонкой металлической пластинке, способной воспринимать колебания окружающей среды, Эдисон укрепил иглу из сапфира. Она едва касалась цилиндра, покрытого оловянным листом. Пластинка под действием звуковой волны колебалась и с различной силой прижимала иглу к цилиндру, и игла процарапывала на нем неравномерной глубины спираль. Так звуки записывались на цилиндр. Чтобы воспроизвести их, достаточно было поместить иглу в начале спирали и с той же скоростью вращать цилиндр. Игла, скользя по борозде, заставляла пластинку воспроизводить звуковые колебания.

Прибор был назван *фонографом*. Совершенствуя его, олово на поверхности цилиндра заменили воском. Затем цилиндр заменили плоской восковой пластинкой, на которую борозда также наносилась по спирали, но колебания иглы шли не в глубину борозды, а по ее ширине. Этот прибор был назван *граммофоном*. У него было огромное преимущество

Граммофон.

Современная конструкция телефонной трубки: *1* — постоянные кольцеобразные магниты; *2* — прокладка; *3* — слуховая раковина; *4* — полюсные надставки; *5* — мембрана; *6* — обмотка; *7* — корпус микротелефона.

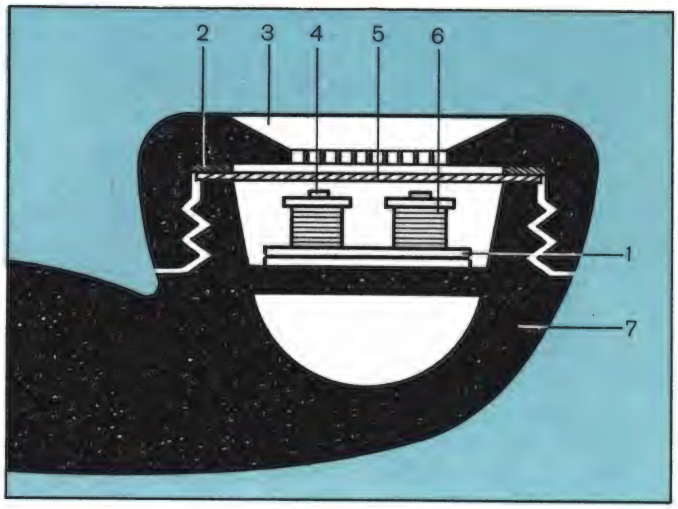
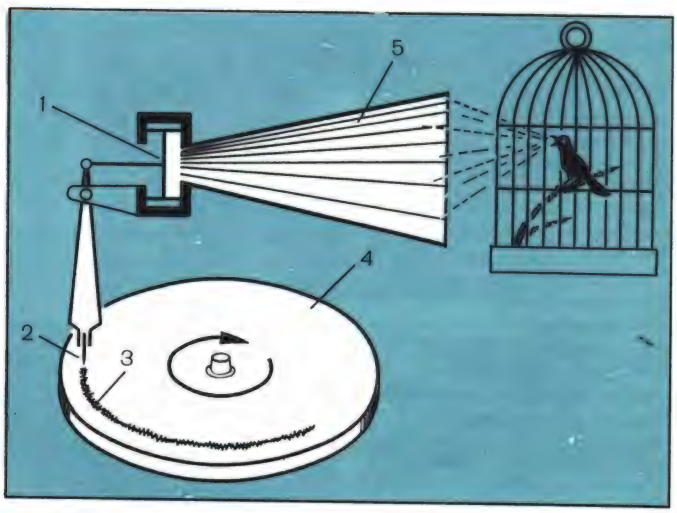


Схема механической записи звука: *1* — мембрана; *2* — резец; *3* — звуковая дорожка; *4* — диск; *5* — рупор.



перед фонографом: стало возможным копировать запись звуков с восковых пластинок на пластмассовые.

В наше время звук записывается на дисках из мягкого, воскообразного вещества. С этого диска методом гальванопластики снимается металлическая копия, и уже с ее помощью штампуются пластмассовые пластинки. Так можно получить много экземпляров одной и той же звукозаписи. Кроме того, существует еще магнитная запись звука и запись с помощью света (см. т. 5 ДЭ, статьи раздела «Радиоэлектроника и техника»).

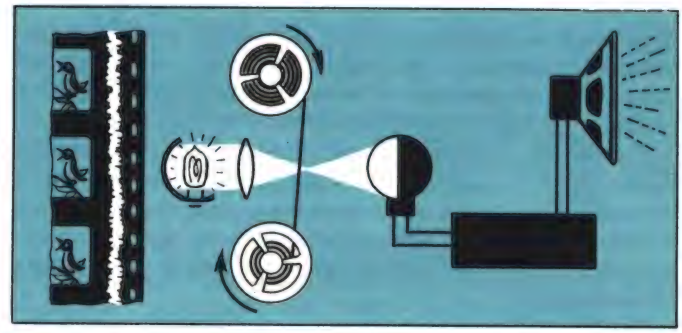
Неслышимые звуки

Когда были созданы высокочувствительные приемники звуков для самых различных частот, обнаружилось, что инфра- и ультразвуки распространены в природе так же широко, как и звуки слышимые. Выяснилось, что их излучают и воспринимают живые существа на суше, в воздухе и в воде и используют их для сигнализации. Собаки, например, воспринимают ультразвуки с частотой до 40 кГц. Этим пользуются дрессировщики, чтобы подать собаке команду, не слышимую людьми. Установленные в море приемники ультразвука обнаруживают его при появлении «плавающих островов» планктона. Оказалось, что крохотные веслоногие рачки в этом планктоне создают ультразвуковые волны, потирая лапку о лапку. В море были обнаружены и слышимые звуки: их издают некоторые рыбы (см. т. 4 ДЭ, ст. «Живые звуки моря»). Само море перед штормом издает инфразвуки: порывистый ветер приводит в движение поверхность воды.

Это излучение на далеком расстоянии ощущают медузы, ракообразные существа, морские блохи и

Запись звука на магнитной ленте.

Схема воспроизведения звука с кинопленки. *Слева* — звуковая дорожка.



гоморусы. Прибрежные животные, услышав инфразвуковой «голос моря», прячутся в глубине или в водорослях. Еще раньше узнают о приближении шторма морские животные, находящиеся вдали от берега, потому что звук вообще распространяется в воде в 5 раз быстрее, чем в воздухе,— со скоростью почти 1500 м/с.

Инфразвук по сравнению со слышимыми звуками мало поглощается воздухом, и потому инфразвуковая волна распространяется на очень далекие расстояния. Приборами улавливаются инфразвуковые волны на большом расстоянии от его источника. Интересно, что на своем пути инфразвук очищается от обертонов, так как воздух поглощает их.

Это имеет большое значение в военном деле. Улавливая инфразвук приборами, весьма точно определяют место, откуда действует дальнобойная артиллерия.

В воде инфразвук поглощается также значительно слабее слышимых звуков и потому может быть уловлен за много сотен километров. Это помогает рыболовецким судам быстро находить стаи рыб, издающих инфразвук.

На очень большой морской глубине, куда не проникает свет, живут рыбы, у которых нет зрения. Но они возмещают его способностью издавать ультразвуковые волны и воспринимать эхо от этих волн. Это позволяет им не только ориентироваться при движении, но и охотиться на других рыб.

Ультразвуком пользуется и летучая мышь. Наблюдая ее стремительный полет, невольно ожидаешь, что она вот-вот налетит на ствол дерева или стену здания. Но каждый раз, встречая на пути препятствие, она стремительно взмывает вверх или круто поворачивает в сторону. Исследования естествоиспытателей доказали, что зрение у летучей мыши весьма слабое. Она почти слепа. Но умение пользоваться ультразвуком и его отражением от предметов помогает ей ориентироваться в сложной обстановке и на лету ловить добычу — мелких мошек.

Излучатели ультразвука

В 1880 г. французские ученые братья Пьер и Поль Кюри исследовали свойства кристаллов. Они заметили, что, если кристалл кварца сжать с двух сторон, на его гранях, перпендикулярных направлению сжатия, возникают электрические заряды: на одной грани — положительные, на другой — отрицательные. Таким же свойством обладают кристаллы турмалина, сегнетовой соли, даже сахара. Заряды на гранях кристалла возникают и при его растяжении. Но на грани, дававшей при сжатии положительный заряд, при растяжении будет отрицательный, и наоборот.

Такое возникновение электрических зарядов на кристаллах при их сжатии или растяжении было названо *пьезоэлектричеством* (от греческого слова «пьезо» — давлю). Кристалл с таким свойством называют *пьезоэлектриком*. В дальнейшем братья Кюри обнаружили, что пьезоэлектрический эффект обратим: если на гранях кристалла создать разноименные электрические заряды, он либо сожмется, либо растянется, в зависимости от того, к какой грани приложен положительный и к какой отрицательный заряд.

Пьезоэлектричество впервые было практически применено лишь в мировой войне 1914—1918 гг. Французский ученый Поль Ланжевен предложил использовать это явление для обнаружения подводных лодок. Винт лодки порождает при своем вращении упругие волны. Они распространяются в воде

со скоростью примерно 1500 м/с. Если пьезоэлектрический кристалл, опущенный в воду, окажется на пути ультразвуковой волны, то волна сожмет его грани и на них появятся электрические заряды.

Ланжевен изобрел и излучатель ультразвуковых волн. Пробуя заряжать грани кварцевого кристалла электричеством от генератора переменного тока высокой частоты, он установил, что кристалл совершает при этом колебания с частотой изменения напряжения.

Чтобы увеличить амплитуду колебаний у пластинок кристалла, Ланжевен воспользовался явлением резонанса: если собственная частота колебаний пластинки совпадает с частотой колебаний напряжения на электродах, амплитуда колебаний на пластинке резко возрастает.

Пьезоэлектрическими свойствами обладает керамика из титаната бария. У керамических излучателей много преимуществ перед кварцевыми. Им можно придавать любые размеры и форму.

Ультразвук удается получать и другим способом. Еще в 1847 г. английский физик Джеймс Джоуль, изучая магнитные свойства металлов, обнаружил, что железные и никелевые стержни изменяют свои размеры при перемагничивании электрическим током. Когда направление тока в обмотке периодически изменяется, стержень то уменьшается, то увеличивается в такт изменениям в направлении тока. В окружающей среде при этом возбуждаются упругие волны, частота которых определяется колебаниями стержня. Это явление было названо *магнитострикцией* (от латинского слова «стриктус» — сжатие).

Эхо помогает водить корабли

Если в горах крикнуть и отметить время до прихода эха, то легко определить расстояние до места, от которого звук был отражен. Для этого достаточно умножить скорость звука на засеченное время и это произведение разделить на два, так как за это время звук прошел «туда» и «обратно».

В 1887—1889 гг. звук впервые применили для определения глубины моря. Источником звука был колокол, звучавший под водой. Результаты опытов не были утешительными: звук, отражаясь от дна, давал очень слабое эхо, еле слышное в шуме моря.

Колокол использовали для предупреждения кораблей во время тумана. Он звонил под водой в центре опасной бухты. Корабли, направлявшиеся в гавань, опускали по бортам слуховые трубы, похожие на уши. Но звучание колокола оказалось и для этого слишком слабым.

Значительно сильнее колокола звучит сирена — вращающийся диск с отверстиями, через которые продувают струю воздуха.

С помощью эха можно измерить глубину моря. В 1912 г. был сконструирован специальный прибор — *эхолот*. У одного из бортов корабля взрывали в воде пороховой патрон, звук взрыва после его отражения от дна принимался на другом борту. Эхолотом можно было измерять глубины до 150 м. Эхолотом был заменен менее совершенный прибор — *лот* (канат с грузом на конце и метками длины).

Вскоре произошло событие, расширившее применение эхолота. В Атлантическом океане в сильный туман корабль-гигант «Титаник» столкнулся на полном ходу с огромным айсбергом. Корабль очень быстро затонул. С тех пор для обнаружения препятствий на пути кораблей стали пользоваться эхолотом. Его повернули из вертикального положения в горизонтальное.

В наше время эхолот усовершенствован и называется *гидролокатором*.

Гидролокатор излучает ультразвук импульсами через определенные промежутки времени. Эхо улавливается несколькими приемниками, отстоящими друг от друга на некотором расстоянии. Все это позволяет более точно определить место препятствия перед кораблем или очертания морского дна.

Звук служит человеку

Если подвергнуть действию мощного ультразвука две несмешивающиеся жидкости, например масло и воду, то на границе взаимного соприкосновения они начинают интенсивно перемешиваться, как бы проникая друг в друга. При этом образуется эмульсия, состоящая из мельчайших капелек масла, распределенных в воде. Так получают, например, различные лекарства, а в пищевой промышленности — маргарин, майонез, различные соусы.

Используется ультразвук и при изготовлении светочувствительных эмульсий для фотопленки и фотобумаги. Он раздробляет зерна бромистого серебра и перемешивает их в каком-либо коллоиде, например в желатине. Чем мельче получаются зерна, тем большее увеличение допускает фотоснимок.

Нарисованные звуки

В кино звук записывают на звуковой дорожке, которая тянется рядом с кинокадрами по краю кинопленки. В 1929 г. советским изобретателям А. Авраамову и Е. Шолпо пришла в голову мысль. чертить эту дорожку искусственно и таким образом создавать музыку, которая не издается никаким музыкальным инструментом, а выходит прямо «из-под пера» композитора. Замысел удался. В 30-е годы у нас в стране было снято несколько мультипликационных фильмов с оригинальным звуковым оформлением — графическим. Шолпо сконструировал для этого специальный аппарат — вариофон.

Затем идеи графической музыки подхватил канадец Н. Мак-Ларен. Его мультипликационные фильмы, озвученные ручным рисованием звуковой дорожки (с рисунков делались фотографии с уменьшением), имели шумный успех.

Продолжением идеи графического звука стала электронная музыка, развивающаяся в разных вариантах в ряде стран.

Кинопленку теперь не применяют — слишком много хлопот с проявлением, печатанием позитивов. Сложные наборы электрических колебаний формируют в генераторах — электронных, электромеханических, оптических — и тут же записывают их на магнитофонную ленту. Разумеется, создавать такую музыку непросто. Композиторы сталкиваются с богатейшим, но еще очень малоосвоенным звуковым материалом.

В 1966 г. в Москве начала работать Экспериментальная студия электронной музыки, где стоит большой электронно-оптический музыкальный синтезатор АНС, названный так в честь русского композитора Александра Николаевича Скрябина. В студии ставятся музыкально-акустические опыты.

Ударная волна сверхзвукового самолета и пастушеский кнут

Полеты сверхзвуковых самолетов над населенными пунктами строго запрещены. Обычный самолет звуковые волны обгоняют и, распространяясь по всем направлениям, постепенно безобидно затухают. Самолет, летящий со скоростью более 1200 км/ч, сам обгоняет собственные звуки. Рокот работающих моторов, свист и грохот рассекаемого крыльями воздуха, все звуковые волны сливаются в одну мощную ударную волну, в вершине которой быстрее звука летит самолет.

Достигая земной поверхности, ударная волна приносит много бед: из окон вылетают стекла, рушатся стены, от страшных ударов, сильнее грома, можно навсегда оглохнуть. Поэтому испытания сверхзвуковых самолетов проводят в пустынной местности, где ударные волны не могут причинить вреда.

Но мало кому известно, что грозные ударные звуковые волны давно уже несут скромную, мирную и полезную службу — они помогают стеречь колхозные стада. Хороший кнут пастуха устроен очень разумно и целесообразно. Многовековой опыт народа воплотил в нем сложный комплекс законов механики. Секрет хорошего кнута в том, что он постепенно к концу становится все тоньше и завершается растрепом — легкой кисточкой.

Умелый, сильный взмах кнутовищем, и вдоль по веревке кнута побежит короткая волна — изгиб. Кинетическая энергия будет сохраняться неизменно по всей длине пробега. Но к концу кнут тоньше, масса меньше, энергия волны постоянна, следовательно, скорость будет очень быстро и очень сильно возрастать, достигая сверхзвуковых значений. Возникает мощная ударная звуковая волна — резкий и оглушительный, как выстрел, удар кнута. Такую ударную волну нередко можно услышать и в цирке. Укротитель с ее помощью приводит к послушанию даже львов.

Запись рельефа дна с помощью ультразвукового эхолота.

Если воздух, в котором много пыли — твердых частиц сажи, цемента, золы и т. п., подвергнуть воздействию мощного ультразвука, мельчайшие твердые частички слипаются друг с другом так прочно, что тот же ультразвук не может преодолеть силы их молекулярного взаимодействия. Образуются крупные частицы, которые легко улавливаются фильтрами или просто падают.

Ультразвук в металлургии

Ультразвук хорошо распространяется в металлах, и, если в металле есть инородные вкрапления (раковины), ультразвуковой луч отражается от них, как от препятствия. Сконструированный специальный прибор — *ультразвуковой дефектоскоп* обнаруживает дефект внутри металла.

Ультразвук на стройке

Дефектоскопом вовремя можно обнаружить глубину и место залегания воздушных полостей в бетонных плитах.

Если дробить цемент или асбест не механически, а ультразвуком, то помол получится особенно мелким, что повышает качество материалов.

Ультразвук режет металл

На обычных современных станках нельзя проделать в металле узкое отверстие сложной формы, например в виде звезды. А с помощью ультразвука это удается. Ультразвуком можно делать винтовую нарезку в металлических деталях, в стекле, в рубине, в алмазе. Большинство ультразвуковых станков

работают бесшумно. В недалеком будущем в цехах металлообрабатывающих заводов не будет ни лязга, ни грохота.

Ультразвук в медицине

Скальпель хирурга можно заменить ультразвуковым лучом. С помощью ультразвукового луча исследуют расположение внутренних органов. Ультразвуком разрушают клетки раковых опухолей, камни в почках. (Подробнее о разнообразных применениях ультразвука см. т. 5 ДЭ, статьи «Новые методы обработки», «Техника помогает лечить».)

Кавитация

Давно было замечено, что гребные винты морских судов быстро изнашиваются при увеличении их частоты вращения. Поверхность отполированного, нержавеющего винта покрывается мелкими щербинками. В конце концов гидродинамические свойства винта, способность его приводить судно в движение, ухудшаются, разрушаются лопасти гидротурбин. Причину этих бед удалось установить, когда обнаружили, что деформируется поверхность электродов, нанесенных на кварцевый пьезоэлектрик, если он излучает мощные ультразвуковые колебания.

При работе гребного вала и лопастей гидротурбины в жидкости создаются мощные упругие колебания ультразвуковой частоты. Жидкость легко выдерживает сжатие, но в момент разрежения она «рвется»: в ней образуется большое количество мелких пузырьков. При следующем сжатии пузырьки захлопываются. В месте захлопывания пузырька происходит как бы микровзрыв, и, если захлопывание случается вблизи поверхности твердого тела, поверхность разрушается. Это явление получило название кавитации. Разрушая лопасти винтов и турбин, кавитация приносит вред. Но кавитация является и основой большинства практических применений ультразвука, ее используют при обработке твердых хрупких материалов — стекла, фарфора, драгоценных камней, сверхтвердых сплавов. С ее помощью можно чистить очень загрязненные или заржавленные металлические детали. Очистка происходит мгновенно.

Итак, вы познакомились с наукой о звуке — акустикой — одной из древнейших наук. Сейчас акустика — сложная современная наука, тесно связанная с многими областями науки и техники.

Наука, необходимая всем

(термодинамика)

Термодинамика — удивительная наука.

Физик, мечтающий, например, овладеть неисчерпаемым источником энергии — осуществить каким-либо путем термоядерную реакцию, прежде чем начать рассчитывать свою сложнейшую установку, спрашивает у термодинамики, возможен ли задуманный им новый физический процесс в области плазменных превращений, и, только получив утвердительный ответ, предпринимает долгий и трудный поиск. Ученый уверен, что, несмотря на возможные, пока еще непреодолимые трудности, его работа может увенчаться успехом.

Если химик старается найти пути, как получить новое, небывалое в природе, задуманное им вещество, которое, как он надеется, должно обладать замечательными свойствами, очень нужными людям, то он тоже прежде всего обратится за советом к термодинамике: можно ли вообще осуществить задуманную им новую реакцию, с помощью которой он рассчитывает получить такое вещество? Если термодинамика даст отрицательный ответ, химик и пытаться не будет осуществлять эту реакцию.

Геолог, изучающий новое рудное, солевое месторождение, советуется с термодинамикой: какие минералы он может в нем найти и в какой последовательности они в этом месторождении могут залегать?

Биологу термодинамика помогает разобраться в бесконечной сложности жизненных процессов, протекающих в живой клетке.

Синоптик, предсказывающий погоду, следящий за движением циклонов, за зарождением ураганов и бурь в океане и в воздухе, использует в своей работе строгие законы термодинамики.

Астрофизик наших дней начинает неплохо разбираться в чудовищной, еще совсем недавно казавшейся совершенно недоступной загадочности явлений в недрах далеких миров, внутри звезд, отстоящих от

нас на сотни и тысячи световых лет. Пожалуй, теперь ученые знают глубины звезд лучше, чем даже неглубокие недра земного шара, которые лежат всего в каких-нибудь десятках километров под нашими ногами. В этом ученым тоже помогла термодинамика.

Инженер, задумавший построить новый тепловой двигатель, прежде подсчитает с помощью термодинамики, какова может быть его эффективность и будет ли он более выгодным, чем существующие. От ответа термодинамики будет зависеть — стоит ли над новой машиной работать.

Термодинамика указала путь, как создавать новые высокоэкономичные машины, и вот старые паровозы, сотню лет честно трудившиеся, начинают исчезать с железных дорог. Водить поезда стали мощные тепловозы, а они созданы и построены на основе термодинамических расчетов.

Термодинамика научила химиков, как использовать неисчерпаемые в воздушном бассейне земного шара запасы азота. Во всех странах мира работают теперь гигантские азотнотуковые химические комбинаты, которые извлекают азот из воздуха и превращают его в удобрения, повышающие урожаи полей. Трудно представить, что было бы, если бы проблема синтеза азотных удобрений не была решена.

Термодинамика помогла найти решение и в сказочной, поистине фантастической проблеме — в синтезе искусственных алмазов. То, что в природе рождалось в течение миллионов лет в неведомые геологические эпохи в неведомых глубинах, теперь создается в сверхпрочных аппаратах физиков под давлением в сотни тысяч атмосфер (десятки гигапаскалей) при температуре 2000° С. Условия реакции, температуру и давление указала физикам термодинамика.

Термодинамика — замечательная наука. Она необходима всем. Законы термодинамики незыблемы и всеобщи, они лежат в основе всех отраслей знания, изучающих все, что существует и развивается в окружающем нас мире.

Что такое термодинамика

Точное определение той науки, которая называется термодинамикой, может показаться сухим, малоинтересным, узким и скучным. *Термодинамика* в своей основе — наука о температуре, теплоте и превращениях теплоты и работы друг в друга.

Свое название эта наука получила от двух греческих слов: «терме» и «динамис». Первое слово означает «теплота». Вторым словом раньше выражали различные понятия: «сила» и «работа».

Что в мире подлежит изучению методами термодинамики?

На этот вопрос нелегко ответить. Все области знания, в которых успешно используются термодинамические методы исследования, перечислить просто невозможно. Как бы сложно ни было изучаемое явление, к какой бы отрасли познания оно ни относилось: к любому разделу физики — от астрофизики до теплофизики или электроники, к любой отрасли химии — от технической химии до сложнейших биохимических процессов,— всюду и всегда наиболее важным, существенным, основным будет переход, превращение одного вида энергии в другой.

Место термодинамики среди других наук

Термодинамика своеобразна. Она многим отличается от других научных дисциплин, изучающих окружающий нас мир. Основанная на простых наблюдениях, на несложных опытах, она развилась в удивительно стройную науку, в основе которой лежит небольшое число основных законов.

Путем строгих логических заключений, методами чисто математических выводов термодинамика устанавливает связь между самыми разнообразными свойствами вещества, позволяет на основании изучения одних, легко измеряемых величин вычислять другие, важные и необходимые, но трудно измеримые или недоступные непосредственному измерению. Термодинамика может быть по праву отнесена к физическим наукам, но в ней существуют разделы: химическая термодинамика и техническая термодинамика. Это самостоятельные дисциплины.

Основные понятия термодинамики

Системы, которые исследует термодинамика

Каждая наука, и термодинамика также, изучает свои определенные области, ограничивая их и выделяя из необозримой сложности и многообразия всей совокупности бесчисленных процессов, протекающих в действительности. Этим упрощается задача

познания неизвестного. Иначе ни одна наука не могла бы развиваться.

Термодинамика изучает *состояние системы* — некоторого определенного количества вещества. Что такое термодинамическая система? Каковы ее свойства? Что называется состоянием системы? Ответить на эти вопросы лучше всего конкретными примерами. Для термодинамика, изучающего химические реакции, системой будет та смесь многих реагирующих веществ в его приборе, где и протекают сложные химические превращения. Ученый-астрофизик назовет системой внутренность гигантской звезды того класса, который он изучает. Залив моря, где происходят кристаллизация и выделение солей из морской воды,— это тоже система для ученых, изучающих с точки зрения термодинамики солевые равновесия.

Перегретый водяной пар в рабочем колесе паровой турбины, взрывчатая газовая смесь паров горючего с воздухом в цилиндре двигателя автомашины, пары сверхвысокого давления в котельном агрегате тепловой электростанции — все это различные системы, свойства и состояния которых изучаются термодинамикой.

Не следует думать, что системы, которые ученые изучают методами термодинамики, обязательно должны быть ограничены реальными твердыми стенками, например бронированными стенками колонн, в которых проводится синтез при высоком давлении на химическом заводе, стенками стеклянной колбы в лаборатории химика, стенками стального цилиндра в двигателе паровой машины или парового насоса.

Исследователь может выделить изучаемую им систему воображаемыми мысленно границами: он может рассматривать образование облака в атмосфере, процессы, происходящие в живой клетке организма, состояние вещества внутри звезды, следить за процессами, протекающими в трубах реактора сложнейшего химического производства.

Система не может быть бесконечной

Термодинамика может изучать любые системы, но одно условие обязательно: система должна быть конечной. Она может быть ничтожно малой, такой, как, например, живая клетка, может быть гигантски большой, как звезда.

Ее законы нельзя распространять не только на всю бесконечную Вселенную, но даже и на значительные области Вселенной, поскольку процессы в них в сильной степени определяются полями тяготения. Размеры систем, для которых применимы законы термодинамики, не могут быть и очень малыми. Эти законы утрачивают смысл для систем, состоящих всего из нескольких молекул.

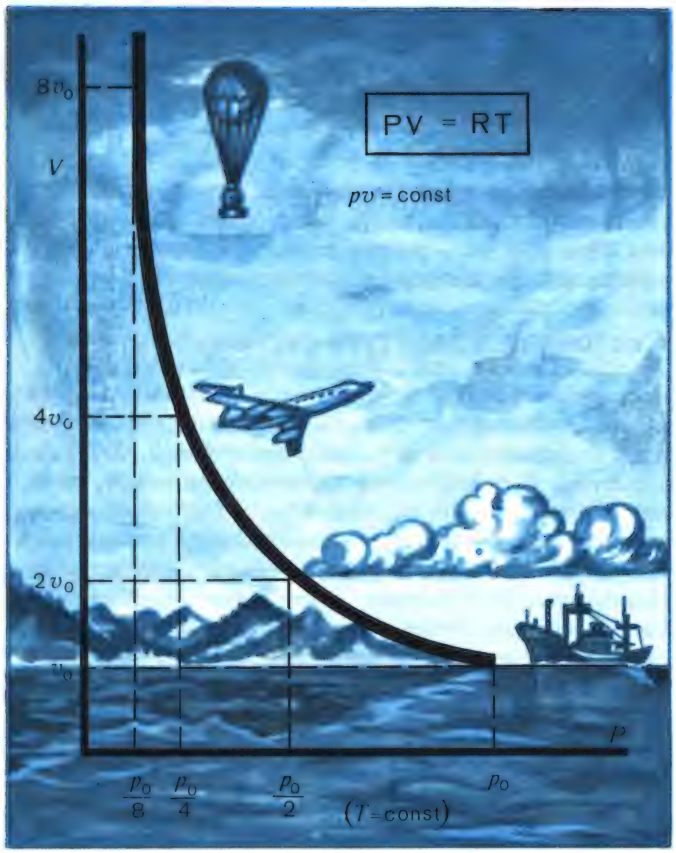
Состояние и свойства системы

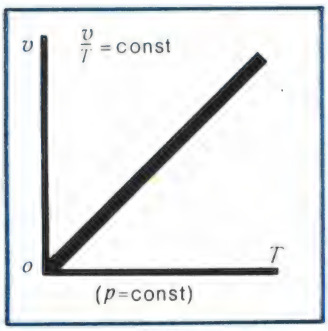
Состояние системы определяется температурой, давлением и объемом. Эти свойства системы хорошо всем знакомы, но они далеко не простые. Состояние водорода, водяного пара, любого газа, воды, любой жидкости, кристалла, самой сложной смеси реагирующих веществ полностью характеризуется соответствующими значениями свойств системы. Иногда ученому-термодинамику приходится принимать во внимание, учитывать и внешние воздействия на систему, от которых может зависеть ее состояние: силу тяжести (например, при изучении свободной атмосферы), электрические или магнитные поля.

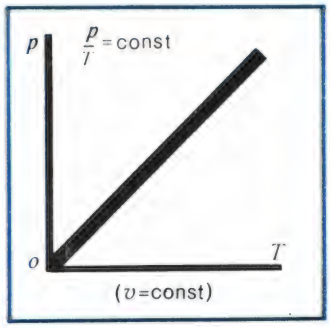
Состояние системы — это совокупность ее свойств. Изменилось состояние системы — изменились и значения ее свойств. Восстановилось снова прежнее состояние — восстановились прежние значения ее свойств. На настоящем состоянии системы ее прошлые состояния не отражаются. Вода остается той же самой водой, если ее заморозить, а потом растопить лед или сначала испарить воду, а потом сконденсировать пар. Изменение свойства не зависит от пути перехода системы из начального состояния в конечное. Очень важно, что справедливо и обратное утверждение: если при переходе системы из одного состояния в другое изменение некоторой величины не зависит от пути перехода, а определяется только начальным и конечным состояниями системы, то эта величина — свойство системы.

Вероятно, у многих может возникнуть вопрос: зачем нужно говорить о простых вещах так неопределенно, туманно и неясно? Если ученый изучает воду, так пусть он ее водой и называет.

Дело в том, что термодинамика очень экономная наука. Если термодинамика дает уравнение для расчета химической реакции, то оно справедливо не только для какой-нибудь одной реакции, но и для всех химических реакций, где бы они ни протекали, кем бы ни проводились, при каких бы условиях ни осуществлялись и какие бы вещества в этих реакциях ни принимали участие. Непреложные термодинамические законы о превращениях энергии в тепловых машинах применимы ко всем тепловым двигателям, как бы они ни были построены, на каком бы принципе они ни работали, даже и к тем тепловым машинам, которые когда-нибудь будут изобретены. Поэтому гораздо правильнее и







Графики уравнения состояния идеального газа. *Вверху* изображена зависимость объема от давления при постоянной температуре. *Внизу* — графики зависимостей изменения объема и давления от температуры. Этому уравнению подчиняется и воздух, только, конечно, нужно учитывать изменение температуры с изменением высоты.

точнее эту замечательную особенность термодинамики выразить так: она изучает состояния и свойства термодинамической системы вообще, любой, какой угодно.

Уравнение состояния

И химику, и теплотехнику, и физику, и конструктору новых космических кораблей мало знать общие закономерности поведения системы вообще. Им нужно рассчитывать конкретные задачи.

Для этого нужно знать уравнение состояния вещества. Его нельзя получить при помощи термодинамики. Оно должно быть найдено независимым путем: точными измерениями или теоретически.

Уравнение состояния необходимо термодинамике знать заранее, без него она ничего не может рассчитать. Оно позволяет рассчитать для определенного вещества любую из четырех важнейших величин — количество вещества (m), его объем (v), давление (p) или температуру (T), если известны три остальные величины:

$$F(m, v, p, T) = 0.$$

Удобнее рассматривать один моль газа, тогда v в уравнении состояния означает мольный объем, т. е. объем одного моля вещества:

$$F(v, p, T) = 0.$$

Каждый школьник знает уравнение состояния идеальных газов, его вывел впервые петербургский профессор француз Б. Клапейрон:

$$pv = RT.$$

Это уравнение хорошо описывает поведение одного моля любого газа при малых давлениях и высоких температурах. Оно очень простое, что сильно облегчает расчеты, и достаточно точное, поэтому его очень часто применяют. Этому замечательному уравнению подчиняются и воздух, которым мы дышим, и раскаленные газы в топках, и плазма внутри звезды, и даже электроны в металле. Выведено оно при допущении, что молекулы газа представляют собой материальные точки: обладают массой, но не имеют объема и никак не взаимодействуют между собой. Поэтому оно и названо *уравнением состояния идеальных газов*.

Такое допущение определяет область, в которой применяется это уравнение: при низком давлении газ занимает настолько большой объем, что объемом самих молекул можно смело пренебречь, а при высокой температуре молекулы обладают такой большой энергией и такой большой скоростью, что взаимное притяжение не влияет на их движение.

Конечно, в действительности нельзя пренебрегать ни собственными размерами молекул, ни их взаимным притяжением. Истинный свободный объем, в котором могут двигаться молекулы ($v - b$), будет меньше объема газа (v), так как часть этого объема (b) занимают молекулы, а давление, под которым находится газ, несколько больше внешнего давления, потому что из-за межмолекулярного притяжения газ испытывает как бы дополнительное сжатие:

$$p + \frac{a}{v^2}.$$

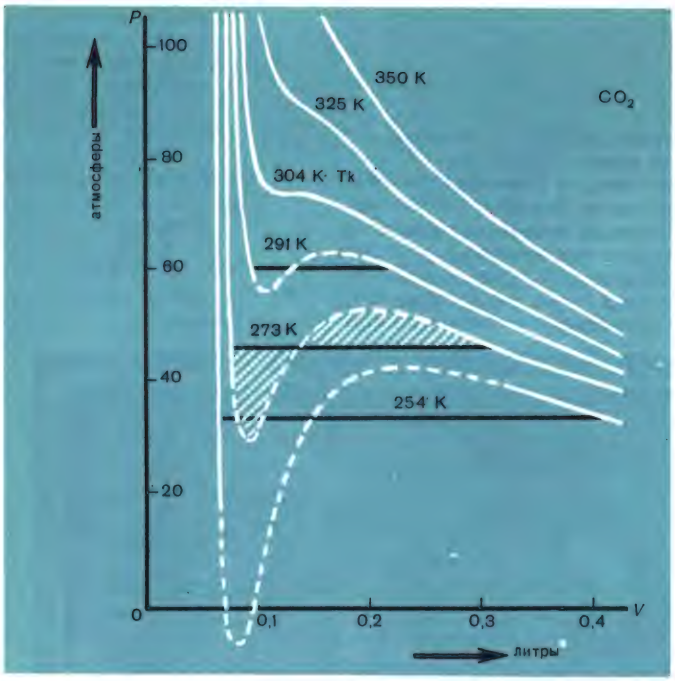


График уравнения состояния реального газа. Кривые на графике передают зависимость между объемом и давлением для углекислого газа при разных температурах. При высоких температурах это уравнение переходит в уравнение идеального газа. Ниже критической температуры (304 К) это уравнение передает сосуществование газа и жидкости. Правая ветвь каждой кривой соответствует газообразной углекислоте, левая — жидкой. Горизонтальный участок — смеси пара и жидкости. Нанесенные пунктиром части кривых нереализуемы; они соответствуют нестабильным состояниям. Небольшие отрезки над горизонтальной прямой и под ней соответствуют переохлажденному пару и перегретой жидкости.

Поправка к давлению должна быть тем больше, чем ближе друг к другу находятся молекулы в газе, чем более он сжат, чем меньший объем занимает. Эта поправка $\left(\frac{a}{v^2}\right)$ обратно пропорциональна квадрату объема: чем он меньше, тем ближе друг к другу молекулы и тем больше притяжение, а кроме того, самих молекул в единице объема больше.

Эти поправки ввел в уравнение идеального газа голландский ученый Я. Ван-дер-Ваальс. Он предложил уравнение

$$\left(p+\frac{a}{v^2}\right)\cdot(v-b)-RT=0,$$

которое называется его именем или *уравнением реальных газов*. R здесь постоянная, которая зависит от количества газа. Это уравнение более точно, чем уравнение Клапейрона, и применимо в значительно более широких пределах при изменении температуры и давления. Поправки a и b определяются из опытных данных. Изучив отклонения от идеального газа в изменении объема газа при сжатии, можно даже довольно точно оценить размеры его молекул.

Знать уравнение состояния очень важно для термодинамики, без него она бессильна при всем своем могуществе. Кроме двух приведенных уравнений состояния были предложены десятки, а может быть, даже и сотни различных форм уравнений состояния, описывающих поведение различных веществ с возможно большей степенью точности.

Таким образом, в совокупности свойств, характеризующих состояние системы, нельзя *произвольно* менять значение *всех* свойств. Эти значения связаны между собой уравнением.

Процесс

Изменение состояния системы называется *процессом*. Это очень широкое и очень важное понятие. В теплое утро влажный воздух над озером, нагретый лучами солнца, высоко поднялся над землей и, расширившись, охладился; влага, находившаяся в нем, начала конденсироваться — мы наблюдаем процесс образования облака. В печи весело потрескивают дрова, согревая комнату,— это процесс химической реакции соединения с кислородом. Гигантский взрыв на выброс, за тысячные доли секунды он прокладывает десятки километров нового канала,— это тоже процесс: химическая реакция разложения взрывчатки и последующее расширение образовавшихся при реакции газов.

Образование перегретого пара высокого давления в паровом котле, его расширение в паровой турбине, охлаждение в конденсаторе — все это процессы, обеспечивающие работу сверхмощной электростанции.

Окружающая среда

Системы, которые изучает термодинамика, хотя и содержат определенную и постоянную массу вещества, совсем не изолированы от окружающего мира. Чтобы в реакторе химика могла успешно протекать нужная ему реакция, он должен предусмотреть, каким способом будет нагреваться или, наоборот, охлаждаться реакционный аппарат. Пар, расширяясь в цилиндрах паровоза, движет поршень, это движение передается на колеса, и тяжелый состав отправляется в путь. Воздух, нагретый у земной поверхности лучами солнца, поднявшись вверх,

$$PV-RT\left\{1+\frac{1}{V}\left[\frac{a}{RT}-b+\frac{c_1N}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}}e^{\frac{T_K}{T}}\right]+\frac{1}{V^2}\left\{\frac{bc_1N}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}}e^{\frac{T_K}{T}}-4\left(1-\frac{4^{c_2/c_1}}{3m_2-4m_1}\right)\left(\frac{c_1N}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}}e^{\frac{T_K}{T}}\right)^2\right\}\right\}=0$$

Уравнение состояния водяного пара: R — постоянная из уравнения идеальных газов; величины a и b взяты из уравнения Ван-дер-Ваальса. Величины c_1, c_2, m_1 и m_2 рассчитываются из опытных данных; N — число молекул в одном грамм-моле. Это уравнение получено советским ученым-термодинамиком Вукаловичем, и по уравнению составлены самые точные в мире таблицы свойств водяного пара. Этими таблицами пользуются инженеры и конструкторы, когда рассчитывают и создают электростанции, турбины, котельные установки, паровые двигатели. Уравнение состояния очень сложно, и расчеты по нему трудны. Но не следует бояться трудных формул. Природа открывает свои тайны тем храбрецам, которые не испытывают страха перед сложными расчетами.

расширяется и раздвигает слои атмосферы на большой высоте, где давление понижено,— образуется облако.

Термодинамика изучает процессы, в которых система не обменивается веществом с окружающей средой, но может обмениваться теплотой и работой. Такая система называется *закрытой*. Как предельный случай система может быть *полностью изолирована* от окружающего мира и не обмениваться с ним ни веществом, ни работой, ни теплотой.

Наиболее важные процессы

Среди множества разнообразных процессов некоторые, наиболее простые, имеют особо важное значение для термодинамики. Из них здесь необходимо упомянуть два вида термодинамических процессов:

1. Те, которые протекают при постоянной температуре, носят название *изотермических*. Таких процессов и в природе, и в технике очень много. Изотермически, например, тает лед, вода превращается в пар, углекислый газ — в сухой лед. Почти все процессы в живом организме протекают при постоянной температуре.

2. Те процессы, которые протекают без обмена теплом с окружающей средой, называются *адиабатическими*. Часто адиабатическим путем протекают очень быстрые процессы, когда система *не успевает* обменяться теплом с окружающей средой.

Если вы заставите расшириться газ, помещенный в термос, ему придется расширяться адиабатическим путем. При этом газ охладится. Один французский рабочий-оружейник придумал в 1803 г., когда еще не были изобретены спички, «воздушное огниво» — закрытую с одного конца трубку с поршнем. Очень быстрое и сильное сжатие воздуха в «воздушном огниве» приводит газ в раскаленное состояние, и трут, прикрепленный к поршню, воспламеняется. Это тоже адиабатический процесс.

Конечно, и при изотермических, и при адиабатических процессах система взаимодействует с окружающей средой.

При изотермических процессах система, совершая работу или изменяя состояние, поглощает из окружающей среды теплоту — ровно столько теплоты, что температура внутри системы остается постоянной. При адиабатических процессах система взаимодействует с окружающим миром, только совершая работу.

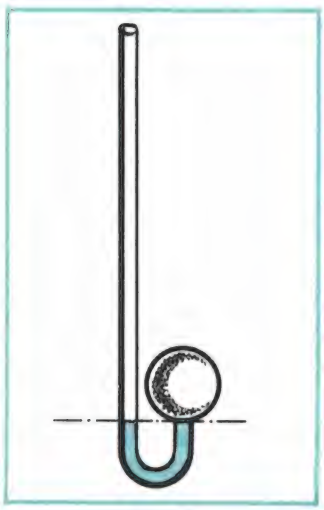
Температура

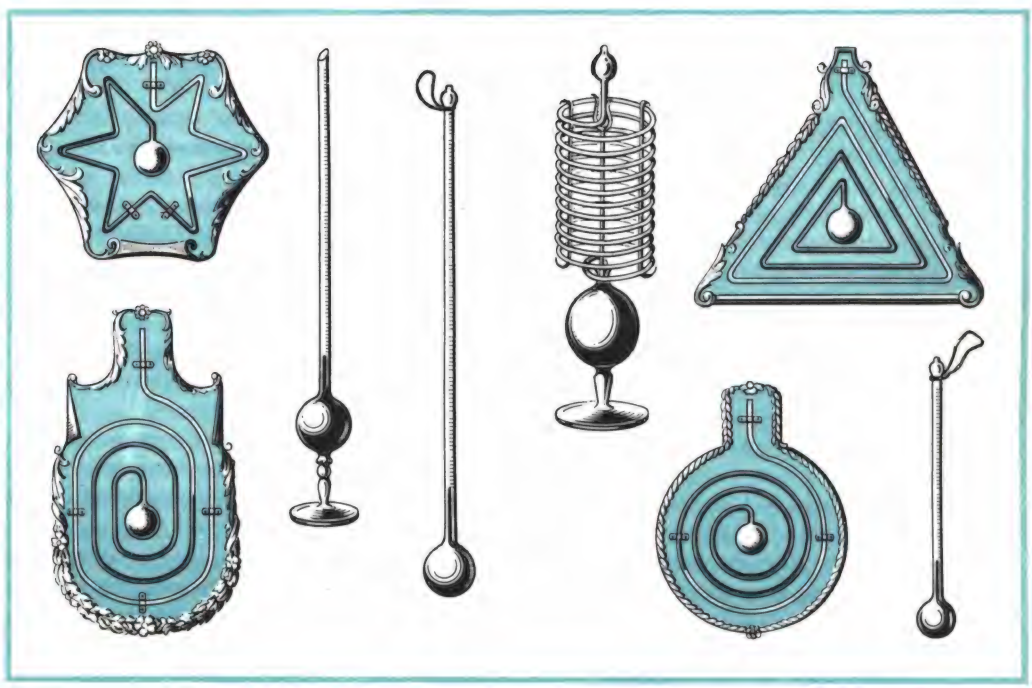
Ощущения тепла и прохлады, жары и холода присущи человеку и играют большую роль в его жизни. Однако понятие *температура* — трудное и тонкое понятие.

Историю термодинамики, собственно говоря, можно начать с изобретения Г. Галилеем в 1592 г. простого устройства — *термоскопа*. Человечество долж-

Воздушный термоскоп постоянного объема, изобретенный в 1702 г. Воздух в шаре (его диаметр примерно 8 см) отсечен от внешнего воздуха ртутью, находящейся в нижней части шара и в узкой трубке (ее диаметр примерно 1 мм). Давление в шаре изменялось, когда изменялась температура. Происходило это практически при постоянном объеме воздуха. Современные гелиевые термометры работают тоже при постоянном объеме.

Жидкостные термоскопы XVII в. Двести лет назад приборы, отмечавшие изменение температуры, делались красивыми, но форма шарика у резервуара для жидкости была неудачна. Такая форма замедляет наступление термического равновесия между термоскопом и исследуемым телом. При заданном объеме шар из всех геометрических фигур имеет наименьшую поверхность. «Шарик» современных жидкостных термометров — сплющенный вытянутый цилиндр.





но быть глубоко благодарно Галилею за его гениальную идею — судить об изменениях температуры по изменениям других свойств тела. Сам Галилей предложил измерять температуру по расширению воздуха. В его первом термоскопе показания искажались изменением барометрического давления. Вскоре был изобретен газовый термоскоп постоянного объема, он оказался значительно более чувствительным и более точным.

Вместо воздуха трубку стали заполнять жидкостью: сначала водой, потом спиртом и, наконец, ртутью. Ртуть оказалась настолько удобной, что один физик XVIII столетия заявил в порыве восторга: «Определенно, природа создала ртуть для изготовления термометров...»

Триста лет назад флорентийские академики открыли, что в смеси воды и льда температура постоянна. Спустя 50 лет стеклодув Д. Фаренгейт установил, что температура кипения воды остается постоянной, если давление не меняется. Эти две постоянные температурные точки дали возможность прокалибровать термоскоп, что и превратило его в *термометр*.

Первое время, чтобы измерять высоту столбика жидкости, расширяющейся при нагревании, делили расстояние между двумя точками — от точки плавления льда до точки кипения воды — на произвольное число равных частей. В 1742 г. А. Цельсий предложил делить расстояние между этими точками ровно на сто частей. Он обозначил температуру плавления льда как *сто градусов*, а температуру кипения воды как *нуль градусов*. Но вскоре эти обозначения поменяли местами. Этой шкалой пользуются уже более 200 лет почти во всем мире. Она удобна, проста и практична.

Что же показывает термометр?

Кажется, что это всем ясно — температуру! А что такое температура?

Очень хорошо сказал по этому поводу один физик: «Гораздо легче производить измерения, чем точно знать, что измеряется». И почти три сотни лет измеряли повсюду температуру, но только совсем недавно, в конце прошлого столетия, стало окончательно ясно, что такое температура.

А в самом деле, что же показывает термометр? Стоит еще раз проследить, как возникло понятие «температура». Когда-то думали: если становится жарко, то это потому, что в теле повышается содержание *теплорода*. Латинское слово «температура» означало «смесь». Под температурой тела понимали смесь из материи тела и теплорода тела. Затем понятие самого теплорода было отброшено как ошибочное, а слово «температура» осталось.

Добрые две сотни лет в науке сохранялось странное положение: случайно выбранным свойством (расширение) случайно выбранного вещества (ртуть) и шкалой, установленной по случайно выбранным постоянным точкам (плавление льда и кипение воды), измерялась величина (температура), а смысл слова «температура», строго говоря, никому не был понятен.

Но ведь термометр все-таки что-то показывает? Если от ответа потребовать необходимую строгость и точность, то на такой вопрос придется ответить так: ничего, кроме удлинения в столбике нагретой ртути.

Ну а если ртуть заменить другим веществом: газом или каким-либо твердым телом, которое также расширяется при нагревании,— что будет тогда? Что будут показывать построенные на иной основе термометры?

Представим себе, что такие термометры мы сделали. Одни из них мы заполнили ртутью, воздухом, другие изготовили целиком из железа, меди, стекла. Точно установим на каждом термометре постоянные точки: в тающем льду 0° С, в кипящей воде 100° С.

Попробуем теперь измерять температуру. Окажется, что, когда воздушный термометр покажет, например, 300° С, другие термометры будут показывать:

ртутный	314,1° С
железный	372,6° С
медный	328,8° С
стеклянный	352,9° С

Какая же из этих «температур» правильна: «воздушная», «ртутная», «железная», «медная» или «стеклянная»? Ведь каждое из испытанных нами веществ показывает свою собственную температуру.

Еще интереснее повел бы себя «водяной» термометр. В пределах от 0 до 4° С он показывал бы при нагревании понижение температуры.

Можно, конечно, попытаться выбрать вместо теплового расширения какое-нибудь другое свойство вещества, изменяющееся при нагревании. Можно, например, построить термометры на основе изменения (при нагревании) давления пара жидкости (например, спирта), изменения электрического сопротивления (например, платины), термоэлектродвижущей силы (термопара). В наше время такие термометры широко применяются в технике.

При условии предварительной калибровки по двум постоянным точкам такие термометры, например, при 200° С будут показывать: спиртовой (по давлению пара) — 1320° С, платиновый (по сопротивлению) — 196° С, спай платины и сплава ее с родием (термопара) — 222° С.

Так какая же из всех этих разных «температур» настоящая? Как и чем нужно измерять температуру?

Прежде чем ответить на эти вопросы, следует уяснить себе самое важное в них — их точное содержание и смысл: *«Чем нужно измерять температуру?»* Почему такой «простой» вопрос вообще может возникать?

В каких единицах мы измеряем длину? В метрах. В чем мы измеряем объемы? Можно измерять в литрах. Литр — это *объем*, равный одному кубическому дециметру. А чем мы измеряем температуру?

Эти вопросы совершенно сходны, но ответы на них принципиально различны. Если мы сольем в бочку несколько ведер холодной воды, то бочка будет заполнена водой. Сумма объемов воды в ведрах будет равна объему бочки. Но сколько бы холодной воды вы ни влили в бочку, *горячей* воды при этом не получится. Рассуждение это совсем не смешно и не наивно, и факт этот вовсе не очевиден сам собой. Это очень важный закон природы, к которому мы просто привыкли, потому что знаем его из опыта. Из нескольких коротких палок можно составить одну длинную, соединив их между собой встык. Но нельзя сложить температуру раскаленного угля из печи и температуру куска льда. Раскаленный уголь от этого не станет более горячим.

Измерять температуру, подобно тому как измеряют длину, объем, массу, нельзя потому, что температуры *не складываются*. Невозможна такая единица температуры, которой можно непосредственно измерять любую температуру, подобно тому как метром измеряют любую длину. Объем, длина, масса — примеры *экстенсивных* (количественных) *свойств системы*. Если железный стержень разделить на несколько частей, температура каждой из них от этого не изменится. Температура — пример *интенсивных* (качественных) *свойств системы*. Непосредственно установить числовое соотношение между различными температурами невозможно и бессмысленно.

Но ведь измерять температуру необходимо. Так как же ее измерять, если ее нельзя измерить методом, пригодным для измерения экстенсивных величин?

Для этого возможен только один путь — использовать объективную связь между температурой и любой экстенсивной величиной: изменением объема, длины, отклонением стрелки гальванометра и т. п.

Поэтому ответ на вопрос: «Какая из перечисленных выше различных «температур» настоящая?» — может показаться с первого раза странным: все они равноправны. Любое свойство системы, зависящее от температуры, может быть выбрано для ее характеристики и измерения.

Термодинамика сумела указать способ и вещество, которое позволяет осуществить температурные измерения наиболее целесообразно. Это идеальный газ. По его расширению при постоянном давлении или по росту давления при постоянном объеме могут быть проведены наиболее целесообразно измерения температуры. При таком способе измерения бесчисленные выражения для любых закономерностей в природе становятся наиболее простыми.

Но у идеального газа есть один существенный недостаток: такого газа нет в природе.

Давление

Насколько сложно и трудно понятие «температура», настолько просто и ясно понятие «давление». Его хорошо знает любой школьник из учебника физики. Давление показывает, какая сила действует на единицу площади поверхности. Направлено давление в случае газов и жидкостей всегда перпендикулярно к поверхности. Понятие «давление» можно применить к твердым телам, но следует помнить, что свойства твердых тел могут зависеть от направления, в котором действует давление (например, пьезоэффект).

В термодинамике давление и температура — два основных, главнейших параметра, определяющих состояние термодинамической системы. Это определение означает, что одна и та же масса вещества при одних и тех же значениях температуры и давления занимает всегда один и тот же объем. Правда, необходимо добавить: это определение справедливо, когда в системе достигнуто равновесное состояние.

Очень полезно знать, что один моль любого газа при 0° С и при нормальном атмосферном давлении 101,3 кПа занимает объем, равный приблизительно 22,4 л. Это стоит запомнить.

Теплота

Наверное, не одна сотня тысяч лет протекла с тех пор, как наши далекие предки впервые познакомились с огнем и научились сами получать теплоту. Каждый из нас грелся у горячей печки и мерз в стужу. Казалось бы, что может быть теперь привычнее и понятнее, чем так хорошо знакомая всем теплота.

Но вопрос: «Что такое теплота?» — далеко не так прост. Правильный ответ на него был найден наукой совсем недавно. Долгое время ученые даже не замечали всей сложности этой проблемы.

Первое истолкование природы теплоты было основано на бесспорном и очевидном как будто бы факте: при нагревании тела его температура повышается, следовательно, тело получает теплоту. При остывании, охлаждаясь, тело ее теряет. Поэтому всякое нагретое тело представляет собой смесь того вещества, из которого оно состоит, и тепла. Чем выше температура тела, тем больше в нем примешано теплоты. Теперь уже мало кто помнит, что слово «температура» в переводе с латинского и означает «смесь». Когда-то, например, о бронзе говорили, что она «температура олова и меди».

Два совершенно различных объяснения, две гипотезы о природе теплоты спорили между собой в науке почти два столетия.

Первую из этих гипотез высказал в 1613 г. великий Галилей. Теплота — это вещество. Оно необычно. Оно способно проникать в любые тела и выходить из них. Тепловое вещество, иначе *теплород*, или *флогистон*, не порождается и не уничтожается, а только перераспределяется между телами. Чем его больше в теле, тем температура тела выше. Еще не так давно говорили — «градус теплоты» (а не температуры), считая, что термометр измеряет крепость смеси из материи и теплорода. (До сих пор еще сохранился обычай мерить в градусах крепость вина — смесь воды и спирта.)

Вторую гипотезу, совершенно, казалось бы, отличную от представления Галилея, высказал в 1620 г. английский философ Ф. Бэкон. Он обратил внимание на то, что было издавна известно любому кузнецу: под сильными ударами молота становится горячим холодный кусочек железа. Известен способ получения огня трением. Значит, ударами и трением можно произвести теплоту, не получая ее от уже нагретого тела. Бэкон из этого заключил, что теплота есть внутреннее движение мельчайших частиц тела и температура тела определяется скоростью движения частиц в нем. Эта теория получила в науке название *механической теории тепло-*

ты. Для ее обоснования и развития очень много сделал гениальный русский ученый Михаил Васильевич Ломоносов.

При коренном расхождении обе гипотезы имеют немало сходства: из теории теплорода следовало, что термометр измеряет *количество* теплорода, содержащегося в теле; согласно же механической теории тепла, термометр показывает *количество* движения, содержащегося в теле. Согласно обеим теориям, должен существовать абсолютный нуль температуры. Он будет достигнут тогда, когда, по теории теплорода, от тела будет отнят *весь* теплород, а по механической теории — когда тело потеряет *все* содержащееся в нем движение.

Теория теплорода почти два века господствовала в науке. Она проста и наглядна. Но она ошибочна. Точное взвешивание тел при разных температурах показало, что теплота невесома. Невесомость теплоты хорошо согласовывалась с механической теорией тепла. Тогда думали, что движение никоим образом не может повлиять на массу тела. Правда, теперь мы знаем, что это не точно. Энергия, согласно закону Эйнштейна, эквивалентна массе; только соответствующая прибавка в массе лежит далеко за пределами даже современной точности взвешивания.

Не следует смешивать теплоту с тепловой энергией тела. Тепловая энергия тела определяется кинетической энергией движения его молекул. Но теплота (это очень важно) далеко не равна тепловой энергии. И еще более важно, что теплота вообще не содержится в теле. Теплоты от дров, горящих в печи, в дровах вообще не было. Теплота только переходит от одного тела к другому.

Совсем нетрудно подсчитать количество энергии хаотического теплового движения в системе, состоящей из молекул перегретого водяного пара,— это и будет его тепловая энергия. Но количество теплоты, которое может выделиться из этой системы при ее охлаждении, совсем не равно тепловой энергии: сначала охладится пар, потом он начнет конденсироваться в жидкую воду, затем охладится вода и, наконец, вода замерзнет. Теплота же испарения воды и теплота плавления льда очень велики. От перегретого пара, таким образом, можно получить гораздо больше теплоты, чем в нем содержится тепловой энергии.

Поэтому, строго говоря, обе гипотезы неверны — ни представление о теплоте как о тепловом веществе, ни механическая теория тепла. Вторая из них подтверждена опытом, но она не имеет никакого отношения к теплоте и касается только тепловой энергии, а это не одно и то же.

Работа

Совершать механическую работу — это значит преодолевать или уничтожать сопротивления: молекулярные силы, силу пружины, силу тяжести, инерцию материи и т. д. Истирать, шлифовать тело, разделять его на части, поднимать грузы, тянуть по дороге повозку, по рельсам поезд, сжимать пружину — все это значит совершать работу, это значит преодолевать в течение некоторого времени сопротивление. Совершать работу — это значит преодолевать сопротивление газа, жидкости, твердого тела, кристалла. Сжимать газ, жидкость, кристалл — это значит совершать работу.

Одним и тем же словом «работа» названы несходные явления, но за внешними различиями надо видеть общие основные черты. Работа связана с *движением*: груз поднимается, повозка перемещается, поршень скользит в цилиндре двигателя. *Без движения нет работы.*

Работа связана с упорядоченным движением. Весь груз перемещается вверх. Вся повозка движется по дороге в одном направлении. Весь поршень в одном направлении движется в цилиндре. Работа невозможна без двух участников. Для поднятия одного груза должен опуститься другой груз, должна распрямиться пружина, должен расшириться газ. Оба участника движутся упорядоченно. *Работа — это передача упорядоченного движения от одной системы к другой.* Работа не связана только с механическим движением, а может совершаться и при изменении электрического или магнитного поля.

Способность системы совершать работу, конечно, очень важна для термодинамики. Но какую именно работу может совершить система — это для термодинамики несущественно. Как именно данную работу можно рассчитать и как ее измерить, должна сказать другая наука.

Определение механической работы дается в *механике*. Это определение знает каждый школьник: работа (A) равна произведению силы (F) на перемещение тела (l) в направлении действия силы.

Если же сила непостоянна, то приходится подсчитывать работу на каждом достаточно малом участке пути (математики говорят — на бесконечно малом), на котором силу можно считать постоянной:

$$dA = Fdl,$$

и затем просуммировать бесконечно малые значения работы по всему пройденному пути:

$$A = \int_{l_1}^{l_2} F\,dl.$$

Тем, кто пугается математических формул, полезно запомнить, что знак интеграла $\int$ — это просто вытянутая буква S — начальная в слове «сумма».

В *физической химии* часто рассматриваются процессы, связанные с дроблением вещества в тонкий порошок (пыль) или с возникновением из пара новой фазы тумана или дыма. При таких процессах возникает огромная новая поверхность множества мельчайших частиц, и на ее образование должна быть затрачена немалая работа. Эту работу нельзя не учитывать. Она равна произведению поверхностного натяжения (σ) на площадь новой поверхности (S):

$$dA = \sigma\, dS, \text{ следовательно, } A = \int_{S_1}^{S_2} \sigma\, dS.$$

Такая работа затрачивается и при выдувании мыльного пузыря.

В *теплотехнике* при подсчете работы любых тепловых машин используется понятие работы расширяющегося газа, например водяного пара в цилиндре паровоза или в паровой турбине или газов в газовой турбине. Этот очень важный вид работы измеряется произведением давления газа на изменение его объема:

$$dA = p\, dv; \quad A = \int_{v_1}^{v_2} p\, dv.$$

В *электрохимии*, например, известен другой вид работы. Электрическая работа аккумулятора или гальванического элемента равна произведению электродвижущей силы (E) на изменение заряда (q):

$$dA = E\, dq; \quad A = \int_{q_1}^{q_2} E\, dq.$$

Полезно заметить и запомнить, что все выражения для различного вида работы очень сходны между собой. Любая работа обязательно измеряется произведением двух сомножителей: некоторой обобщенной силы f (это может быть сила всемирного тяготения, сила магнитного или электрического поля, давление, поверхностное натяжение, любые механические силы и т. д.) и величины a (изменение соответствующего параметра системы: перемещение, электрические заряды, площадь поверхности, объем и т. д.):

$$A = \int f\, da.$$

В задачи термодинамики не входит изучение различий между разными видами работы. Это рассматривается в других науках. Различных работ может быть очень много. Теплота только одна.

Теплота и работа

Нам нужно, чтобы машины для нас пахали землю, собирали урожай, мололи зерно, чтобы нас возили поезда и автомобили, чтобы по воздуху мчались самолеты, чтобы межпланетные корабли взлетали в космос, а подводные лодки изучали глубины океанов. Нам нужно, чтобы машины вгрызались в землю и добывали руду и уголь.

К одним из них мы должны подводить провода и направлять в их моторы электрический ток, полученный либо на *тепловой* электростанции, где за счет *теплоты*, выделяющейся при сгорании угля, рождается электроэнергия, либо на гидростанциях, где в турбинах энергия падающей воды, приобретенная ею только от *теплоты* солнечных лучей, превращается в энергию электрического тока. Другие машины нуждаются в топливе и *работают* за счет *теплоты* сгорания бензина, нефти, угля.

В реакторах атомных электростанций, атомного ледокола, атомных подводных кораблей выделяется при ядерном распаде огромное количество *теплоты*, за счет которой и работают их турбины и двигатели. Энергию атома мы пока умеем получать только в виде *теплоты*.

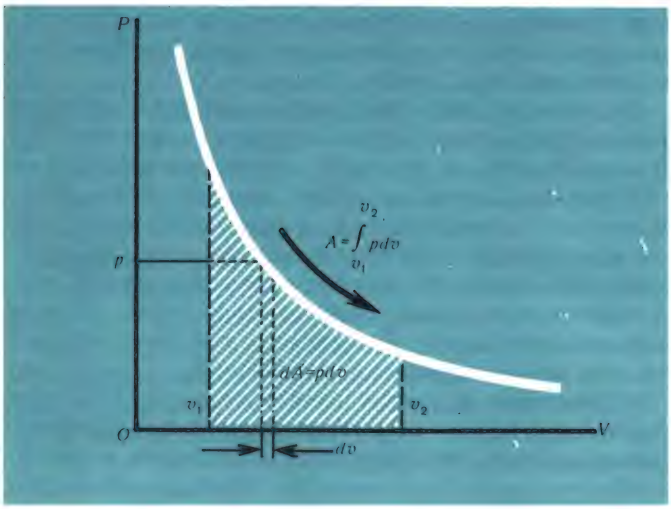
В системе (в атомном реакторе, в топке и котле паровой машины, в цилиндре автомобильного двигателя) теплоты нет, точно так же в ней нет и работы. Движение не было теплотой, пока оно содержалось в горячем теле, движение не стало теплотой, когда оно вошло в холодное тело и нагрело его. Теплота — это не свойство системы. И о теплоте, и о работе можно говорить только в связи с процессом и во время процесса, совершаемого системой, но не в связи с ее состоянием. Теплота и работа подобны; и та и другая — это передача движения из одной системы в другую. В этом их сходство.

Различие между ними велико и принципиально. Теплота — это передача хаотического, беспорядочного движения молекул. Такая передача происходит всегда только от нагретого тела к холодному. Работа — это передача упорядоченного, направленного движения.

Как превратить в упорядоченное возможно большую часть хаотического движения, как с помощью тепла получить наибольшее количество работы — это важная задача термодинамики.

Пример расчета очень важной работы

В качестве примера рассчитаем работу изотермического расширения идеального газа. Хотя для этого и придется иметь дело с интегрированием, пугаться



График, показывающий работу расширения газа. Эта работа определяется площадью, расположенной под кривой. График показывает изменение давления в зависимости от изменения объема в изучаемом процессе. На рисунке изображена работа, совершаемая газом при изотермическом расширении. Работа обратного процесса — сжатие газа — такая же, но у нее обратный знак. Чтобы сжать газ, нужно совершить над ним работу.

Термодинамический цикл может быть каким угодно. Система может любым путем перейти от начального состояния (*a*) в любое другое (*b*) и любым другим путем вернуться точно в исходное состояние. При этом система совершит работу, которая равна площади цикла на графике зависимости между давлением и объемом. Если такой же цикл провести в обратном направлении, то эта площадь будет равна работе, которую придется затратить.

не следует. Те, кто внимательно прочитал том 2 ДЭ, с этой задачей легко справятся.

Работа расширения любого тела, а следовательно, и любого газа при бесконечно малом изменении его объема $dA = pdv$. По уравнению идеального газа $pv = RT$ можно определить его давление:

$$p = \frac{RT}{v} .$$

Следовательно, работа расширяющегося идеального газа при бесконечно малом изменении его объема будет:

$$dA = RT\frac{dv}{v} .$$

Работа, совершенная при расширении одного моля идеального газа от малого объема v_1 до большого v_2:

$$A = RT\int_{v_1}^{v_2}\frac{dv}{v} ,$$

а это выражение равно:

$$A = RT\ln\frac{v_2}{v_1} .$$

Это одна из важных формул термодинамики. Области ее применения буквально неисчислимы.

Энергия

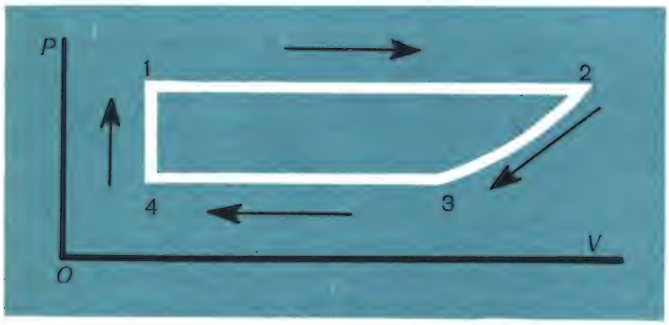
Повсюду, в любом теле, существующем в мире, при любой температуре, молекулы и атомы находятся в непрерывном движении. Сумма их кинетических энергий определяет тепловую энергию тела. Даже и при абсолютном нуле сохраняется молекулярное колебательное движение. При абсолютном нуле всякое тело поэтому обладает энергией. Она так и называется *нулевой энергией*. Эта энергия очень мала, но пренебрегать ею нельзя: она играет очень важную роль в квантовых расчетах химических равновесий.

Потенциальная энергия взаимодействия атомов в молекулах или в кристаллической решетке тела — это запас его химической энергии. Ее можно определять по-разному. Можно, например, подсчитать энергию, необходимую для того, чтобы разрушить вещество тела на отдельные молекулы, разорвав в нем межмолекулярные связи. Затем, нарушив межатомные химические связи, разделить молекулы на атомы и разбросать все атомы на бесконечно большое расстояние, так, чтобы они не взаимодействовали между собой. Только ни один инженер не согласится с таким способом подсчета энергии в топливе. Ему от такого способа, важного и нужного для теоретика, очень мало пользы. Инженер-практик предпочтет просто-напросто сжечь уголь и измерить количество выделившегося тепла.

Физик, подсчитывая энергию тела, задумается о ее запасах, скрытых в атомах, образующих тело. Он получит разные результаты, учитывая либо только энергию ядерного расщепления, либо принципиально возможную, хотя пока еще недостижимую энергию аннигиляции.

Но ведь любое тело, брошенное наклонно вверх, пока летит, обладает, кроме того, собственной кинетической энергией поступательного движения и изменяющейся потенциальной энергией в поле притяжения Земли. Спутник, выведенный на орбиту,

Термодинамические циклы совершаются вокруг нас повседневно. Простой цикл, изображенный на этом рисунке, может соответствовать многим различным процессам, протекающим в природе, в лаборатории ученого, на химическом заводе. Например, этот чертеж соответствует и такому циклу изменения состояния воды в природе: состояние *1* — вода в луже нагрета солнцем, упругость ее пара высока; она начинает постепенно испаряться; объем сильно увеличивается; состояние *2* — вся вода превратилась в пар; теплый легкий пар постепенно поднимается вверх; температура падает; объем пара уменьшается; состояние *3* — охлажденный пар высоко над землей; начинается конденсация; появилось облако; пошел дождь; состояние *4* — весь пар превратился в холодные капли дождя; они падают на землю, где их нагревает солнце; вода возвращается в исходное состояние *1*. Цикл завершен и может начаться снова.
На рисунке нет ни лужи, ни облаков, ни солнца. Они для термодинамики не важны сами по себе. Термодинамика в каждом процессе выделяет самое главное, что его определяет. Поэтому закономерность, полученная термодинамикой при исследовании одного явления, может объяснить очень много других, даже как будто бы совершенно различных процессов.



сохраняет приданную ему энергию. Упавший камень не остается в покое. Он участвует в сложном движении поверхности земного шара: вращаясь вместе с ним, летит вокруг Солнца, уносится с Солнечной системой в галактическом движении, летит вместе с Галактикой в глубину космоса... Каждому движению соответствует своя доля энергии.

Чему же равна энергия тела? Теплотехник не обращает внимания на запасы химической энергии водяного пара. Ведь использовать их он не может: вода в котле остается только водой, хотя и превращается в пар.

Химика не интересует скрытая в атомах ядерная энергия. Ее запасы в исходных веществах и продуктах реакции одни и те же. Атомы до химической реакции и после нее остаются в колбах химика или в его заводских аппаратах теми же самыми атомами. И химикам, и физикам, и инженерам в голову не придет обращать внимание на движение их реторт, атомных реакторов, тепловых машин вместе с Землей в космосе. Ведь все эти аппараты неподвижны относительно земной поверхности. Но астрофизик, изучающий тайны рождения звезд, уже не может пренебрегать энергией движения исследуемых им тел в космосе.

Несомненно, наука проникнет еще дальше и в глубь атома. Будут открыты новые, еще неизвестные структурные элементы ядерных частиц. Их энергия связи, конечно, будет превышать энергию связи атома. Этот процесс расширения нашего познания никогда не завершится — вещество неисчерпаемо...

Чему же равна энергия тела? Так поставленный вопрос смысла не имеет и термодинамику не интересует.

Термодинамический цикл

Попробуйте представить себе какую угодно термодинамическую систему. Вообразите себе хотя бы один моль газа, или десять молей воды (почти один стакан), или что вам угодно. Чтобы перевести любую систему из одного состояния в другое, с ней нужно что-то сделать: либо совершить над ней работу, либо, наоборот, предоставить системе произвести работу и при этом либо нагреть систему — передать тепло, либо охладить ее — тепло отнять. Если, нагревая стакан воды, превратить ее в пар при постоянном давлении, придется не только затратить тепло, но и произвести немалую работу. Работу образовавшегося и расширяющегося пара подсчитать нетрудно: он приподнимает весь слой атмосферного воздуха вплоть до границ стратосферы.

Теперь представьте себе, что вы проделали с вашей системой тысячи самых разнообразных операций: вы могли ее охлаждать, нагревать, сжимать, расширять, электризовать, намагничивать... Пусть при этом протекают какие угодно превращения и какие угодно химические реакции, но только при одном условии: пусть после всего этого система вернется точно в свое исходное, первоначальное состояние. Термодинамический процесс, каким бы он сложным ни был, из скольких бы промежуточных стадий ни состоял, в результате которого система возвращается в свое исходное состояние, называется *термодинамическим циклом*. Это одно из самых важных понятий термодинамики.

В результате проведенного термодинамического цикла в системе ничего не изменилось: физическое состояние и строение всех ее частей, движение всех ее молекул — все вернулось к исходному положению, и с нашей системой ничего не произошло.

Но ведь в процессе цикла была совершена работа либо самой системой (при расширении пара), либо над системой (при сжатии газа). Алгебраическая сумма всех работ на всех этапах цикла — это и есть *полученная работа*. Кроме того, поглощалась теплота (при испарении воды) или она выделялась (при конденсации пара), алгебраическая сумма всей теплоты на всех этапах цикла — это *поглощенная* системой *теплота*.

Что же все-таки в итоге цикла произошло? Куда исчезла теплота? Откуда взялась работа?

Закон термического равновесия

Закон термического равновесия основан на опыте. Открытие его не связано с именами выдающихся исследователей и с определенной датой. Он был установлен еще до того, как было завершено создание термометра.

«Применение термоскопов научило нас следующему: пусть 1000 и более различных родов материи — металлы, камни, соли, дерево, пробка, перья, шерсть, вода и ряд других жидкостей — имеют вначале различные температуры. Поместим все эти тела в комнату без огня, не освещенную солнцем. Более горячие из этих тел будут охлаждаться, более холодные нагреваться в течение дня или нескольких часов. По окончании этого периода приложим термоскоп последовательно к каждому телу: показания термоскопа для всех тел будут одинаковыми». Так наглядно сформулировал этот закон живший во второй половине XVIII в. Дж. Блэк, которому термодинамика обязана многими крупными открытиями.

Нас не удивляет, когда мы теперь, глядя на термометр, говорим, что у больного повышенная температура. Ведь термометр показывает свою собственную температуру. Ей равна температура тела, с которой термометр находился в термическом равновесии.

«Два тела, находясь в термическом равновесии с третьим телом, находятся в термическом равновесии и между собой. Это вовсе не само собой понятно, но очень замечательно и важно» — так сказал о законе термического равновесия замечательный немецкий физик Макс Планк. Таким образом, закон термического равновесия — это *эмпирический* (опытный) закон. Мало того, этот закон не только не очевидный, сам собою разумеющийся, но и всего лишь приближенный закон.

Теперь, в результате применения теории относительности к термодинамике систем, находящихся в сильных полях тяготения, выяснено, что в таких системах при термическом равновесии температура в разных частях должна быть различной. В центре гигантской звезды, даже если она находится в термическом равновесии, температура должна быть выше, чем на ее поверхности.

Химик и физик, работающие в земных условиях, могут спокойно руководствоваться законом термического равновесия, но и астрофизику, изучающему Вселенную, приходится вносить в него существенные поправки.

Первое начало термодинамики

Закон эквивалентности тепла и работы

В 1807 г. физик Ж. Гей-Люссак, изучавший свойства газов, поставил простой опыт. Этому опыту было суждено сыграть особую роль в истории термодинамики. Случилось так, что при этом опыте присутствовали его друзья: физик и математик П. Лаплас и химик К. Бертолле. Имена этих французских ученых знают теперь все школьники мира.

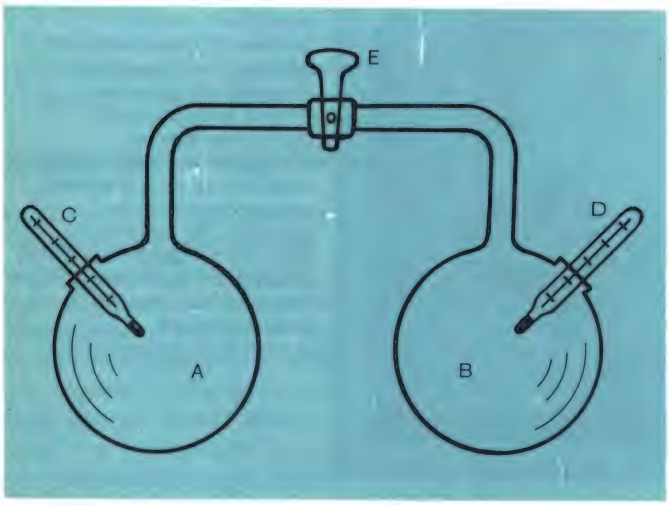
Давно было известно, что сжатый газ, расширяясь, охлаждается. Правда, никто не знал почему. Гей-Люссак предположил, что это может происходить потому, что теплоемкость газа зависит от его объема. Он решил проверить это и заставил газ расширяться в пустоту — в сосуд, воздух из которого был предварительно откачан. К удивлению всех трех ученых, наблюдавших опыт, никакого понижения температуры не произошло, температура всего газа не изменилась. Исследователи не могли объяснить результат: почему один и тот же газ, одинаково сжатый, расширяясь, охлаждается, если его выпускать прямо наружу в атмосферу, и не охлаждается, если его выпускать в пустой сосуд, где давление равно нулю?

Этот опыт был неверно задуман. Полученный результат, как и следовало ожидать, не оправдал предположения ученого, и он не понял смысла опыта. Гей-Люссак и его ученые друзья сделали крупное открытие и не сумели его заметить.

Честь первой точной формулировки одного из величайших законов всего естествознания принадлежит немецкому врачу Роберту Майеру. Работая в тропиках, он заметил, что цвет венозной крови у жителей жаркого климата более яркий и алый, чем темный цвет крови у жителей холодной Европы. Наука движется странными путями, и, казалось бы, что может быть общего между расширением газа в пустоту и различием в цвете крови? Но, однако, гениальный ученый сумел найти единое в несравнимом.

Майер правильно объяснил яркость крови у жителей тропиков: вследствие высокой температуры организму приходится вырабатывать меньше теплоты, ведь в жарком климате люди не зябнут. Поэтому в жарких странах артериальная кровь меньше окисляется и остается почти такой же алой, когда переходит в вены.

У Майера возникла мысль: не изменится ли количество теплоты, выделяемой организмом, при окислении одного и того же количества пищи, если



Опыт Гей-Люссака. В стеклянном двенадцатилитровом баллоне *A* находился воздух, из такого же баллона *B* воздух выкачан. *C* и *D* — чувствительные термометры. После открытия крана *E* воздух перетекает в баллон *B*, пока в обоих баллонах не устанавливается одинаковое давление. Температура в баллоне *A* понижается ровно на столько, на сколько она повышается в баллоне *B*. Если массы газа, находящиеся в баллонах, смешать, температура расширенного газа будет равна первоначальной температуре газа, имевшего меньший объем.

организм помимо выделения теплоты будет еще производить работу? Если количество теплоты не изменяется, то из одного и того же количества пищи можно получать то больше, то меньше тепла, так как работу организма можно снова превратить в тепло, например, путем трения. Если количество теплоты изменяется, то работа и теплота обязаны своим происхождением одному и тому же источнику — окисленной в организме пище, т. е. *работа и теплота могут превращаться одна в другую.*

Эта замечательная идея сразу дала возможность Майеру сделать ясным загадочный результат в опыте Гей-Люссака: если теплота и работа взаимно превращаются, то при расширении газа в пустоту, когда он не производит никакой работы, так как нет никакой силы (давления), противодействующей увеличению его объема, газ и не должен охлаждаться. Если же при расширении газа ему приходится производить работу против внешнего давления, его температура должна понижаться. Даром работу получить нельзя! Но если теплота и работа могут превращаться друг в друга, если эти физические величины сходны, то возникает вопрос о соотношении между ними.

Майер первым поставил вопрос, сколько требуется работы для определенного количества теплоты и наоборот. Он очень красиво решил эту важнейшую задачу всей физики.

Давно было известно, что для нагревания газа при постоянном давлении, когда газ расширяется, нужно больше тепла, чем для нагревания газа в замкнутом сосуде, т. е. что теплоемкость газа при постоянном давлении c_p больше, чем при постоянном объеме c_v. Эти величины были уже измерены и хорошо известны. Было установлено, что, хотя обе величины c_p и c_v зависят от природы газа, разность между ними почти одинакова для всех газов

$$8{,}4\ \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}\ ,\ \text{или}\ c_p - c_v = 2\ \frac{\text{кал}}{\text{моль}\cdot{}^\circ\text{C}}\ .$$

Майер понял, что эта разность в теплоте обусловлена тем, что газ, расширяясь, совершает работу.

Работу одного моля расширяющегося газа при нагревании на 1° С вычислить нетрудно. Любой газ при малой плотности можно считать идеальным — его уравнение состояния было известно: $pv = RT$. Нагреем этот газ на 1° С, при этом он расширится, и при постоянном давлении его объем возрастет на некоторую величину Δv. Тогда по уравнению состояния

$$p(v + \Delta v) = R(T + 1).$$

Нетрудно найти, что

$$p\Delta v = R.$$

Это замечательный результат — он объясняет физический смысл газовой постоянной R. Она равна работе расширения газа при постоянном давлении, если газ нагревается на 1° С.

Майер нашел, что для любого газа

$$c_p - c_v = R.$$

Это уравнение с тех пор носит его имя.

Было известно, что величина

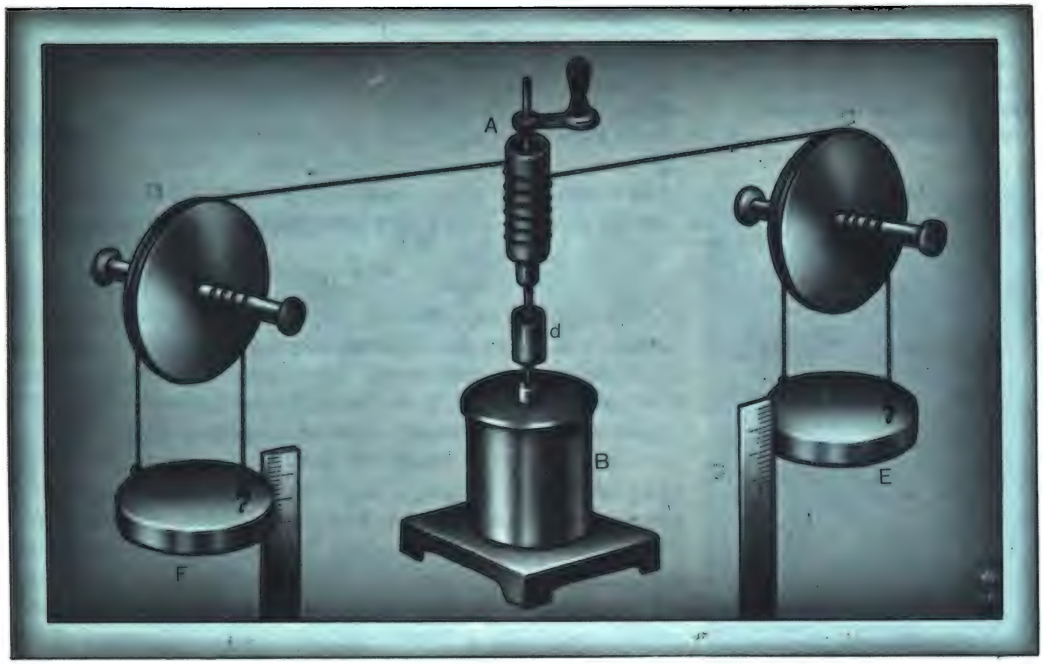
$$R = 0{,}848\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{\text{моль}\cdot{}^\circ\text{C}} \quad \left(R = 8{,}31\ \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}\right).$$

Следовательно, 2 кал равны 0,848 кгс · м работы. Нетрудно вычислить, что 1 ккал равна 424 кгс · м.

Эту величину называют *механическим эквивалентом тепла.*

Замечательный результат Майера был много раз подтвержден прямыми измерениями; особое значение имели опыты Джоуля, который измерял количество работы, необходимое для нагревания жидкости вращающейся в ней мешалкой. Одновременно измерялись и работа, затраченная на вращение мешалки, и теплота, полученная жидкостью. Как ни менялись условия опыта, брались разные жидкости, разные сосуды и мешалки, результат был один и тот же: всегда из одного и того же количества работы получалось одно и то же количество тепла. Расчеты Майера и опыты Джоуля решили двухвековой спор о природе теплоты.

В наши дни, когда и для теплоты, и для работы применяется одна и та же мера, обе эти величины измеряются в джоулях. Доказанный Майером и Джоулем принцип эквивалентности между теплотой и работой может быть сформулирован очень просто: *во всех случаях, когда из теплоты появ-*



Опыт Джоуля. Жидкость в сосуде *B* перемешивается при адиабатических условиях мешалкой *Ad*. Источник работы — грузы *E* и *F*. Грузы, опускаясь, вращают мешалку. Над системой (жидкость, сосуд, мешалка) производится работа. Температура системы поднимается. Чтобы восстановить первоначальную температуру, через стенки сосуда при неподвижной мешалке отбирают теплоту. Ее количество измеряют. Цикл закончен, измерения произведены. Остается вычислить механический эквивалент теплоты.

ляется работа, тратится количество тепла, равное полученной работе, и, наоборот, при затрате работы получается то же количество тепла.

Этот замечательный вывод был назван *законом эквивалентности*. Согласно этому закону *работу можно превратить в теплоту и, наоборот, теплоту — в работу, причем обе эти величины равны друг другу.*

Внимательный читатель, наверное, уже заметил, что это, конечно, справедливо только для кругового процесса, когда система совершает цикл и возвращается в исходное состояние. Расчеты Майера и опыты Джоуля касались именно таких термодинамических циклов. В каждом случае при расчете учитывалось, что система (газ, жидкость) должна быть приведена к исходным условиям.

Таким образом, для любого кругового процесса совершенная системой работа A равна полученной системой теплоте Q (если измерять и теплоту и работу в одних и тех же единицах):

$$A = Q, \quad \text{или} \quad Q - A = 0.$$

Это уравнение и выражает первый закон эквивалентности: *нельзя осуществить цикл, в котором система произвела бы работу и не получила бы теплоту.* В качестве примера можно взять любую тепловую машину. Все они могут работать только на основе циклов: ведь каждая из них должна работать непрерывно.

Внутренняя энергия и первое начало термодинамики

Система, совершив цикл, восстановила свое исходное состояние. В ней ничего не изменилось — ни вещество, ни движение. Для кругового процесса величина $\boxed{Q - A}$ равна нулю. Из этого следует очень важный вывод, и его надо хорошо продумать и усвоить: *для некругового процесса эта величина должна зависеть только от начального и конечного состояния системы, но не от пути перехода.* Это очень важно. Это значит, что существует для каждой термодинамической системы величина, обладающая всеми признаками свойства системы. Это свойство и названо внутренней энергией («энергия» в переводе с греческого — деятельность). Она зависит только от состояния системы. Разность этой величины при переходе системы из одного состояния в другое равна $Q - A$.

Для термодинамики важно и необходимо знать разность значений внутренней энергии при переходе из одного состояния в другое. Эта величина определяется на опыте или расчетным путем по уравнению

$$\Delta u = u_2 - u_1 = Q - A$$

(u — обозначение внутренней энергии).

Этим замечательным уравнением выражается первое начало *термодинамики*. В него нужно хорошенько вдуматься. Из него вытекает, например, вся термохимия: если проводить химические реакции без изменения объема, то работа $A = p\Delta v$ будет равна нулю. Тогда тепловой эффект реакции — теплота, поглощаемая или выделяющаяся при химических реакциях, не будет зависеть от промежуточных путей в процессе реакции. Это и есть известный закон термохимии, открытый петербургским академиком Г. И. Гессом незадолго до работ Майера.

Открытие первого начала термодинамики покончило навеки со страстной мечтой тысяч и тысяч

изобретателей: создать *вечный двигатель*, способный работать даром, без затраты энергии.

Первое начало термодинамики часто так и формулируют: *вечный двигатель невозможен.*

Единый закон сохранения

Физик наших дней, рассчитывая атомный реактор, конечно, тоже пользуется первым началом термодинамики, но применяет его уже в новой, обобщенной форме. Установленная А. Эйнштейном эквивалентность массы и энергии связала между собой *закон сохранения вещества* (важнейший закон всей химии) и *закон сохранения энергии* (основной закон классической физики) в единый *закон сохранения — о неизменности суммы массы и энергии.* Ему подчиняются все процессы и явления в микромире атомных ядер и элементарных частиц. И мы теперь знаем, что нагретое тело имеет большую массу, чем холодное.

История науки полна удивительных предвидений. М. В. Ломоносов еще в 1748 г., почти за сто лет до работы Майера, сумел впервые четко и строго высказать и сформулировать замечательную, фундаментальную мысль о единстве законов сохранения движения и материи. Он писал: «...но все изменения, совершающиеся в природе, происходят таким образом, что сколько к чему прибавилось, столько же отнимается у другого. Так, сколько к одному телу прибавилось вещества, столько же отнимется у другого... Этот закон природы является настолько всеобщим, что простирается и на правила движения: тело, возбуждающее толчком к движению другое, столько же теряет своего движения, сколько отдает от себя этого движения другому телу».

Для Ломоносова, как и для физика наших дней, великие законы сохранения вещества и сохранения энергии были единым общим законом природы.

Второе начало термодинамики

Многие великие ученые во многих странах пытались разгадать тайну взаимного превращения тепла и работы. Поиски закона сохранения продолжались столетиями. Вплотную подошли к закону сохранения, почти открыли его на опыте и... не поняли, что сделали, французские ученые, о которых была речь выше.

Конечно, честь строгой формулировки и строгого доказательства закона эквивалентности принадлежит Майеру и Джоулю. Но многим и многим ученым надлежит воздать честь и принести благодарность за открытие первого начала термодинамики.

Никола Леонар Сади Карно (1796—1832)

Французский физик и инженер, создатель теории тепловых двигателей. Из анализа идеального кругового процесса (цикла Карно) впервые установил, что только при переходе тепла от тела нагретого к телу холодному можно получить полезную работу и, наоборот, чтобы передать тепло от холодного тела к нагретому, необходимо затратить работу. Карно высказал положение, что только разность температур обусловливает работу, получаемую при посредстве теплоты. При этом природа работающего вещества в тепловой машине не играет никакой роли (теорема Карно). Позже идеи Карно, изложенные в труде «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», послужили основой новой науки — термодинамики.

Второй великий закон термодинамики — второе начало термодинамики — связан только с одним именем. Его открыл молодой французский инженер Сади Карно.

Цикл Карно

Молодой инженер Карно рассчитывал и строил водяные двигатели. Но в это же время во Франции начали широко применять паровые машины, и важнейшей научно-технической задачей стало создание теории тепловых машин.

К решению этой задачи приступил и Карно. Строго говоря, к этому он совсем не был подготовлен. Он еще не мог знать, откуда берется работа в тепловых машинах, не знал, для чего нужна теплота, и считал, как его учили, что теплота — вещество. Но Карно был гениальным исследователем и сумел правильно решить одну из труднейших задач естествознания: при каких обязательных условиях возможно превращение теплоты в работу?

Хорошо знакомый с расчетом водяных двигателей, Карно уподобил теплоту воде. Чтобы водяная мельница могла молоть зерно — работать, необходимо одно условие: вода должна падать с высокого уровня на низкий. Карно предположил: чтобы теплота могла совершать работу, она тоже должна переходить с высокого уровня на низкий, и разность высот для воды соответствует разности температур для теплоты.

В 1824 г. Карно высказал гениальную мысль: *для производства работы в тепловой машине необходима разность температур*, необходимы два источника теплоты с различными температурами. Это утверждение — главное в теории Карно. Оно называется *принципом Карно.*

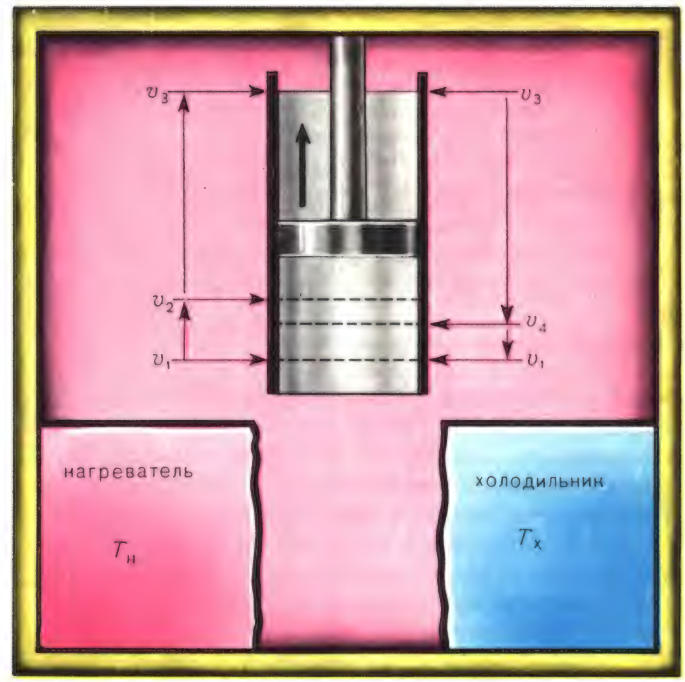
На основе открытого им принципа Карно придумал цикл идеальной тепловой машины, которую не может превзойти никакая другая машина. Этот цикл изучают теперь во всех вузах мира.

Придется цикл рассмотреть и нам. Такая машина никогда не была построена, ее вообще нельзя построить. Но ни одна когда-либо действовавшая машина не имела такого огромного значения для развития техники, как эта, придуманная молодым французским инженером и неосуществленная.

В соответствии с принципом Карно мы должны предположить, что располагаем источником теплоты с высокой температурой (нагревателем) и холодильником с низкой температурой. В этом требовании, конечно, ничего необычайного нет: и топка (нагреватель) и холодильник обязательно есть во всякой тепловой машине.

Теперь представим себе цилиндр с поршнем. В цилиндре находится газ. Для расчета удобнее взять один моль идеального газа. (Сам Карно брал для этой цели воздух.) Предоставим инженерам-конструкторам придумывать детали механизма, который позволил бы использовать получаемую работу, и сосредоточим внимание только на самом главном и существенном для всякой машины — на ее рабочем цикле.

Как должна работать идеальная машина? Каким способом нужно нагревать газ, чтобы он, расширившись, мог совершить нужную нам работу?

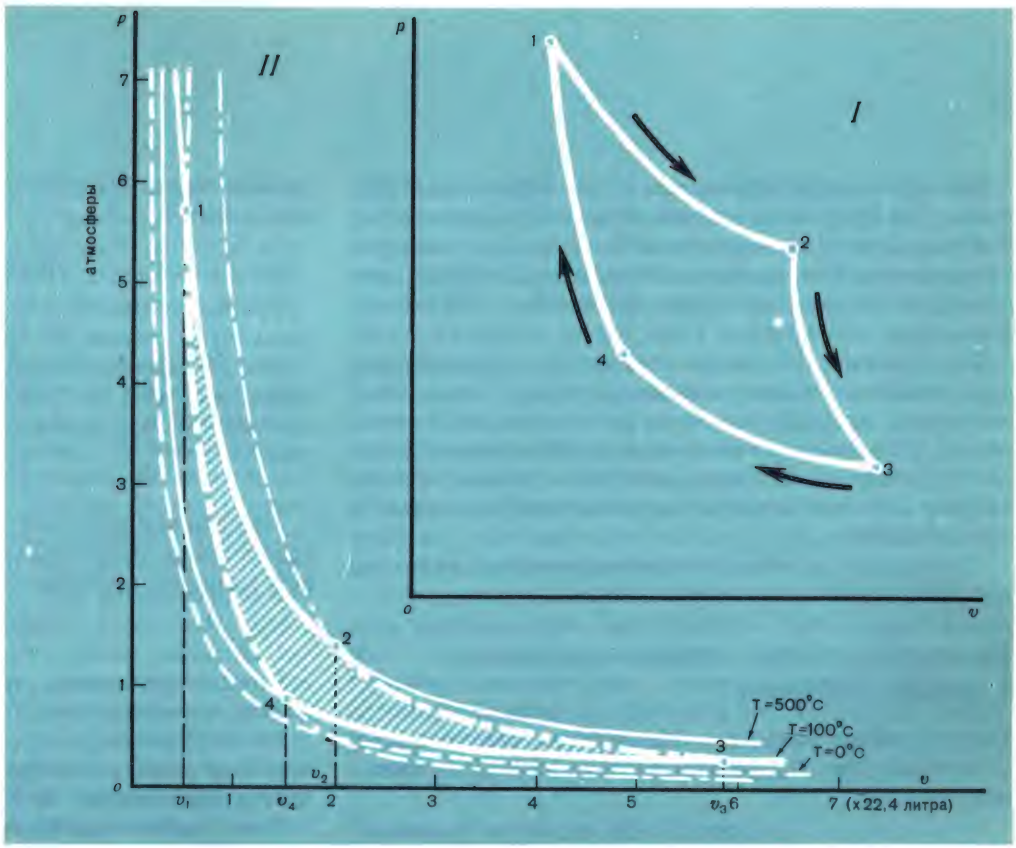


Идеальная машина по представлениям Сади Карно. Это простой цилиндр с поршнем. Нижняя стенка цилиндра обладает идеальной теплопроводностью; его можно поставить на горячую поверхность нагревателя (например, заполненного смесью расплавленного и твердого свинца) или на поверхность холодильника (например, со смесью воды и льда). Оба источника теплоты бесконечно велики. Если цилиндр не соприкасается с нагревателем или холодильником, в цилиндре полностью прекращается обмен теплом с окружающей средой.

Если при нагревании газа в цилиндре между нагревателем и газом установится хотя бы даже очень малая разница температур, то это явно будет невыгодно, ведь, согласно принципу Карно, за счет этой разности можно было бы получить еще дополнительную работу. Значит, газ в цилиндре должен расширяться точно при температуре нагревателя, т. е. расширяться изотермически, сохраняя на протяжении всего пути расширения постоянную температуру.

Мы уже знаем, как протекает процесс изотермического расширения газа. Давление его при этом падает. Сколько при таком расширении будет получено работы, мы тоже знаем. Газ в цилиндре нагрелся и расширился, но машина должна работать непрерывно. Для этого ее рабочий процесс должен быть обязательно замкнутым — циклическим. Следовательно, нагретый газ должен быть охлажден и сжат.

Как это сделать? У нас в распоряжении есть холодильник с низкой температурой. Казалось бы, можно просто привести цилиндр в соприкосновение с холодильником, и газ охладится. Но тогда возникнет разность температур между горячим еще газом и холодильником, и снова будет потеряна, в соот-



Цикл работы идеальной машины Карно. Стенка цилиндра приходит в соприкосновение с нагревателем. Рабочее вещество (у Карно — воздух) начинает изотермически расширяться от начального объема *1* до объема *2*. Поршень поднимается. Нагреватель передает рабочему веществу столько тепла, сколько необходимо для поддержания постоянной температуры. Количество твердого свинца увеличивается, жидкого — уменьшается. Цилиндр снят с нагревателя. Поступление тепла прекращено, но рабочее вещество продолжает расширяться и поршень продолжает подниматься, совершая в адиабатических условиях максимальное количество работы (например, поднимает груз). Температура воздуха падает и достигает температуры холодильника. При этом рабочий газ расширяется до объема *3*. Цилиндр приводится в соприкосновение с холодильником. Воздух изотермически сжимается до объема *4*. Для этого нужно затратить работу. Поршень с грузом опускается. Чтобы температура оставалась постоянной, тепло отводится от рабочего вещества через стенку в холодильник. Часть льда тает — количество воды увеличивается. Снова прекращается контакт цилиндра, теперь уже с холодильником. Источник работы (например, опускающийся груз) сжимает газ адиабатически. Температура его повышается, пока не достигнет температуры нагревателя. Цикл завершен. Количество тепла, полученное цилиндром от нагревателя, больше, чем переданное цилиндром холодильнику. Разность теплоты затрачена на то, чтобы совершить работу. Цикл Карно изображен на чертеже дважды. *I* — так его изображают обычно во всех учебниках и книгах, жертвуя точностью ради наглядности. Чтобы представить себе, как в действительности выглядит график цикла Карно, рядом приведено его точное изображение *II* для одного моля одноатомного идеального газа (гелия) в пределах от $T_х$=100°C до $T_н$=500°C. Этот чертеж стоит внимательно рассмотреть. На нем объемы выражены в мольных объемах, давление — в атмосферах. Нанесены три изотермы: 0°C, 100°C и 500°C. Точно проведены и линии адиабат. Выигрыш работы представлен заштрихованной площадью цикла.

ветствии с принципом Карно, возможность получить дополнительную работу. Так делать нельзя. Гениальная идея Карно заключается в том, что он предоставил газу возможность расширяться без обмена теплом — адиабатическим путем. Согласно первому началу термодинамики, температура газа будет при этом падать. Предоставим ей возможность упасть до температуры холодильника. На этом этапе будет дополнительно получено некоторое количество работы без затраты тепла, только за счет внутренней энергии газа.

Приведем газ в цилиндре в тепловой контакт с холодильником и начнем его сжимать при низкой температуре. Конечно, на основе принципа Карно мы можем это сжатие проводить тоже только изотермическим путем. На этом участке процесса придется затратить на сжатие газа часть той работы, которая была получена при расширении газа. Но это ничего, часть ее останется.

Когда газ достаточно сжат (насколько его нужно сжать изотермически, это нетрудно рассчитать), необходимо повысить его температуру до температуры нагревателя, чтобы можно было начать новый цикл. Газ над поршнем должен занять свой прежний объем. Как это сделать? Нагревать нельзя. Появление разности температур недопустимо. Оно каждый раз означает потерю возможности получить еще дополнительную работу.

Значит, можно только сжать газ адиабатическим путем, без получения теплоты извне. При таком сжатии возрастет его внутренняя энергия и повысится температура. Когда температура газа достигнет температуры нагревателя, адиабатическое сжатие закончится.

Газ пришел в прежнее состояние, круговой процесс закончен, можно начинать новый цикл. Если верен сам принцип, то лучшую машину построить нельзя. С помощью такой идеальной машины можно получить наибольшее количество работы при заданном перепаде температур между нагревателем и холодильником.

Повторяем: в действительности машина, работающая по циклу Карно, неосуществима.

Сколько работы можно получить в машине Карно?

Это подсчитать нетрудно. На первом участке цикла идеальный газ совершает работу изотермического расширения:

$$A_н = RT_н \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры, а она не меняется. Следовательно, газ совершает работу только за счет тепла, полученного от нагревателя. И работа равна теплу:

$$Q_н = RT_н \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

При адиабатическом расширении газ работу совершает, а тепла не получает.

При изотермическом сжатии при температуре холодильника над газом приходится совершать работу. На этом участке цикла будет совершена работа:

$$A_х = RT_х \ln \frac{v_4}{v_3}.$$

При изотермическом сжатии тепло, выделяющееся при постоянной температуре, полностью передается холодильнику, потому что внутренняя энергия газа остается постоянной:

$$A_х = Q_х = RT_х \ln \frac{v_4}{v_3}.$$

На последнем этапе приходится затрачивать работу, но при адиабатическом сжатии газ не выделяет тепло: работа целиком идет на повышение внутренней энергии газа. Сжатие должно продолжаться, пока не будет достигнута исходная температура. Цикл закончен.

От нагревателя машина получила $Q_н$ Дж тепла. Отдала холодильнику $Q_х$ Дж. В работу превращено, по первому началу термодинамики, $Q_н - Q_х$ Дж. Таким образом, машина смогла превратить в работу не все тепло, полученное от нагревателя, а только часть его:

$$\eta = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н}.$$

Эта величина называется в термодинамике *коэффициентом полезного действия машины.*

Мы его можем легко вычислить, если примем во внимание, что, по условиям адиабатического сжатия, объем газа изменяется в одно и то же число раз, т. е.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}.$$

Подставляя значения $Q_н$ и $Q_х$, получим после сокращения замечательный результат: к.п.д. тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

К.п.д. определяется только температурами нагревателя и холодильника и не зависит ни от чего.

Не искушенный в термодинамике читатель должен был прийти в недоумение: где же второе начало термодинамики? В чем же оно состоит?

Весь расчет коэффициента полезного действия был проведен, по-видимому, только на основании закона термического равновесия и первого начала. Никаких дополнительных закономерностей как будто бы не понадобилось. Но так только кажется. Новое здесь в требовании располагать по крайней мере двумя источниками теплоты с различными температурами, чтобы привести в действие тепловую машину. Из-за этого требования в работу превращается не все количество теплоты, полученное машиной от нагревателя, к.п.д. машины получается меньше единицы. Этот новый закон назван *вторым началом термодинамики.*

Возможен ли вечный двигатель второго рода?

А что будет, если тот же самый цикл Карно, работающий с идеальным газом, провести наоборот, по обратному циклу? Это сообразить нетрудно. Такая машина заберет тепло от холодильника, превратит полностью в тепло затраченную на осуществление цикла работу и сумму теплоты отдаст нагревателю. Получится холодильная машина.

Представим себе, что у нас две машины одинаковой мощности. Обе работают по одинаковому циклу Карно, между одними и теми же температурами. У обеих машин и нагреватель и холодильник общие. В одной из них работает идеальный газ, а во второй — любое другое вещество. Будут ли к.п.д. этих машин одинаковыми или разными?

Допустим сначала, что к.п.д. двух таких машин различны. Все равно у какой машины к.п.д. больше, какая машина лучше — та, в которой работает идеальный газ, или же та, в которой содержится какое-то другое вещество. Проделаем с обеими машинами следующий сложный цикл.

Машину, у которой к.п.д. больше, заставим совершить нормальный цикл. За счет части тепла, взятого от нагревателя, получим работу, а остальную часть тепла отдадим холодильнику. Вторая машина хуже, ее к.п.д. меньше. Мы получили бы от этой машины за счет такого же количества тепла, взятого от нагревателя, меньше работы и больше тепла передали бы холодильнику. Но мы заставим ее работать в обратном направлении, как холодильную машину. В этом случае она заберет от холодильника больше тепла, чем отдаст ему первая машина, затратит на это меньше работы, чем получено в первой машине, а нагреватель получит обратно ровно столько же тепла, сколько забрала первая машина. И в результате нагреватель останется без изменения.

Теперь соединим обе машины вместе и заставим первую приводить в действие вторую. При этом в нашем распоряжении останется избыток работы. Обе вместе они будут представлять собой такую машину, которая черпает тепло из холодильника и превращает его в работу. Этот результат, конечно, не противоречит первому началу термодинамики. Но если бы это было возможно, мы могли бы построить вечный двигатель, который работал бы вечно за счет неисчерпаемых запасов энергии, скрытых, например, в Ледовитом океане, в воздухе, в любом море — где угодно. Такая машина названа *вечным двигателем второго рода.*

Второе начало термодинамики утверждает, что *вечный двигатель второго рода невозможен.* Такое утверждение, конечно, только пересказ принципа Карно и сведений больше, чем этот принцип, не содержит.

Следовательно, к.п.д. машины, работающей по циклу Карно, *не может зависеть от природы вещества, работающего в цикле.* Для тепловой машины, работающей по циклу Карно с любым веществом, максимально возможный к.п.д. должен быть все равно:

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

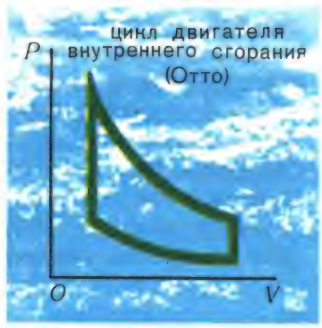
Это поистине удивительное уравнение. Из него следует: 1) что для повышения к.п.д. тепловой машины следует уменьшить температуру холодильника $T_х$ и увеличить температуру нагревателя $T_н$; 2) что термический к.п.д. тепловой машины всегда меньше 1. Этому уравнению подчиняется вся современная техника. Из-за него в наше время уходят с железных дорог на слом паровозы. В паровом котле паровоза нельзя получить пар достаточно высокой температуры, и нельзя от сжигаемого топлива получить много работы. Паровозы невыгодны. В двигателях внутреннего сгорания температура в цилиндрах гораздо выше, и поэтому они более экономичны. Это простое и ничем с виду не примечательное уравнение заставляет теплотехников строить котлы на электростанциях с максимально возможным высоким давлением, что само по себе совершенно не необходимо. Нужна высокая температура. Но что поделаешь, если давление водяного пара очень быстро растет с повышением температуры.

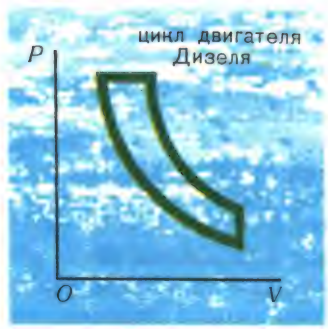
Это уравнение заставляет металлургов вырабатывать сверхпрочные жаростойкие стали, конструкторов — создавать новые многоступенчатые паровые турбины сверхвысокого давления, чтобы получать огромную мощность. Химиков оно заставляет разрабатывать для космических ракет новое горючее с максимально высокой температурой горения.

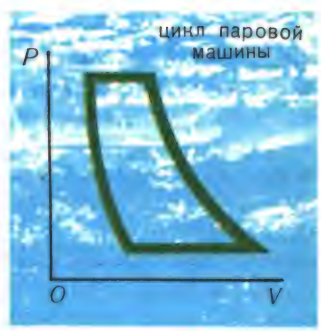
Почему нельзя построить идеальную машину?

Основным требованием, положенным в основу машины, работающей по циклу Карно, было полное равновесие между нагревателем и газом при расширении, между холодильником и газом при его сжатии. Газ обязательно должен изменять свой объем при постоянной температуре, *точно* равной температуре источника тепла. Но если между ними нет температурной разницы, тепло не может переходить от нагревателя к газу. Если эта разность очень мала, то передача тепла будет очень медленной. При бесконечно малой температурной разности переход будет бесконечно медленным, т. е., попросту, такая машина работать не сможет, потому что те процессы, на которых она основана, практически неосуществимы. Не меньшую трудность представляет требование полного равновесия между давлением, оказываемым на поршень, и изотермически изменяющимся давлением газа. Если давление, оказываемое на поршень, будет больше давления газа, газ сожмется, его температура повысится, равновесие будет нарушено — машина перестанет быть идеальной. Зачем же такую невозможную машину придумывать, если ее все равно нельзя построить?

Идеальная тепловая машина, совершая цикл, крайне близка к состоянию термического равновесия с источниками теплоты и крайне близка к состоянию механического равновесия с источником работы.







Схематизированные изображения циклов в наиболее распространенных двигателях. *Слева* — цикл двигателя внутреннего сгорания (так называемый цикл Отто). Так работают двигатели автомобилей и старых самолетов. В *середине* — цикл двигателя Дизеля. Этот двигатель более экономичен и применяется в машинах с большой мощностью: в тепловозах, судовых двигателях. *Справа* — цикл паровой машины. Этот цикл наименее экономичен. Во всех этих машинах используется адиабатическое расширение рабочего вещества (газа или пара). Оно наиболее выгодно. В двигателях внутреннего сгорания вспышка газовоздушной смеси происходит мгновенно и объем поршневого пространства не успевает измениться. В двигателе Дизеля топливо подается постепенно и его горение протекает при постоянном давлении. В паровой машине при постоянном давлении подается пар. Коэффициенты полезного действия всех этих машин, конечно, значительно ниже, чем у идеальной машины Карно.

Подобные процессы называются *квазистатическими* (как будто бы равновесными). У них есть важная особенность: перемена направления процесса на обратный (расширение газа на сжатие) меняет только знаки у теплоты и работы на обратные. Абсолютные их значения не меняются. Даже мысленно только при квазистатических процессах в цикле мы могли заставить машину Карно работать в обратном направлении в качестве холодильной машины с теми же результатами, только обратными по знаку.

Современная термодинамика имеет дело главным образом с такими квазистатическими, остающимися всегда в равновесии, внутренне противоречивыми по существу процессами, которые не могут происходить. Но от этого выводы термодинамики ничего не теряют в своем практическом значении.

Примером может служить ее второе начало.

«Сколько нужно снежков, чтобы натопить печь!»

Так иронизировал лет двести назад знаменитый философ и естествоиспытатель Д. Дидро. Его насмешливый вопрос по существу совершенно правилен и совсем не бессмыслен.

Отапливать снегом можно, но дорого. Мало того, это постоянно происходит повсюду, где есть самый обыкновенный домашний холодильник. Ведь теплота, отнимаемая от охлаждаемых продуктов, теплота конденсации и теплота замерзания влаги, т. е. теплота образования снега и его охлаждения, выделяется из холодильника и обогревает комнату. В этом легко убедиться, приложив руку к задней стенке холодильника: она всегда теплая.

Холодильная машина может с успехом служить и для отопления. Вместо того чтобы прямо расходовать электроэнергию на электрические печи, обогревающие дом, лучше ее использовать для приведения в действие холодильного цикла и отапливать дом с ее помощью снегом. Нетрудно доказать, что это вполне возможно.

Пусть температура снега на улице $-3°$ С (предположим, что зима теплая, сущность вопроса это не изменит, а расчет упростит; можно снег заменить холодной водой из реки или хоть даже из Ледовитого океана — будет еще выгоднее). Температуру отопительных приборов в здании установим $27°$ С. Разность между обеими температурами равна $30°$ С. Абсолютная температура нагревателя $27 + 273 = 300$ К. К.п.д. тепловой машины, работающей между такими близкими температурными пределами, очень мал — всего только

$$\eta = \frac{30}{300} = 0{,}1.$$

Это значит, что если мы захотим получать в такой машине работу, то из каждых 10 Дж тепла, полученных от нагревателя, в самом лучшем случае мы можем превратить в работу только 1 Дж.

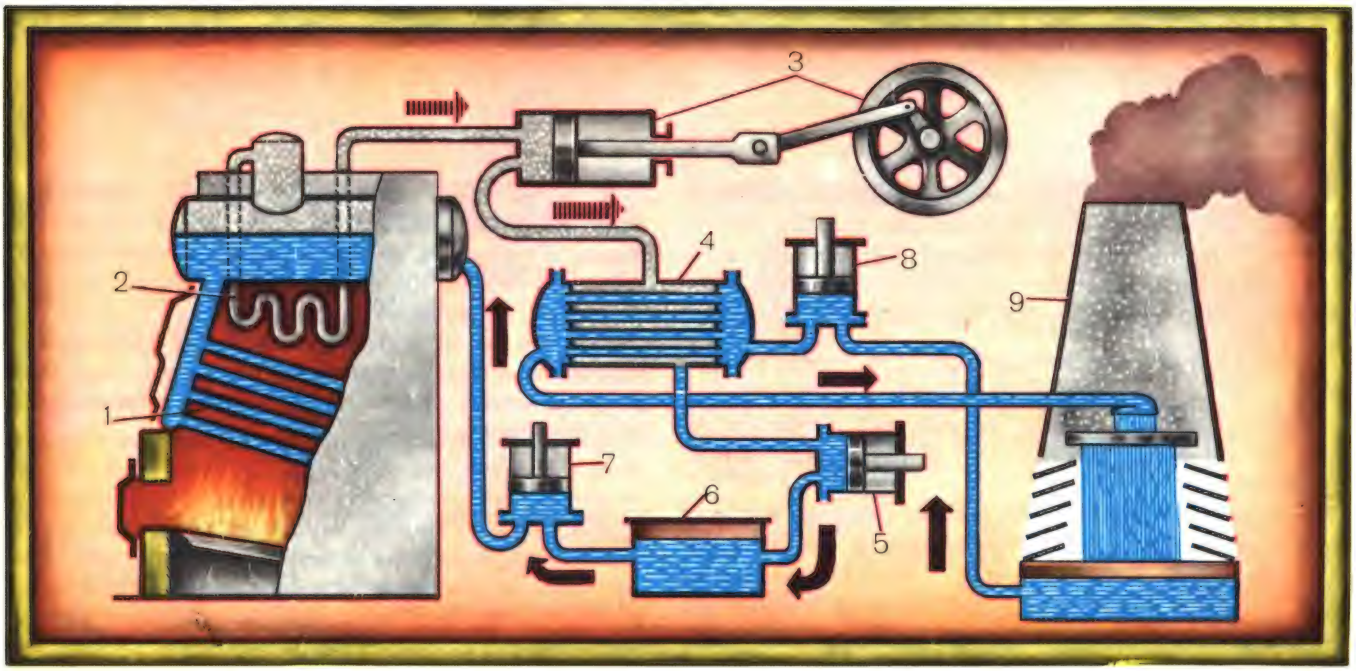


Схема теплосиловой установки. Пар получается в паровом котле (*1*) и подается в пароперегреватель (*2*). Отработав в двигателе (*3*), пар идет в конденсатор-холодильник (*4*). Конденсатный насос (*5*) направляет пар в конденсатный бак (*6*), откуда он питательным насосом высокого давления (*7*) подается в котел. Цикл изменений состояния рабочего тела завершен. Источником охлаждения служит вода, прогоняемая циркуляционным насосом (*8*) через трубки конденсатора-холодильника. В охлаждающем устройстве — градирне (*9*) нагревшаяся вода отдает свое тепло атмосферному воздуху и снова подается в конденсатор.

Но если мы заставим ту же машину работать в обратном направлении, то, затратив работу, эквивалентную только 1 Дж, сможем передать нагревателю (печке) целых 10 Дж, из которых 9 Дж будут получены от холодильника (снега). Чем не подлинное отопление снегом?

Как измеряют температуру теперь!

Открытие второго начала термодинамики привело к возможности создать очень целесообразную шкалу температур. Ее установили, пользуясь понятием к.п.д. обратимой идеальной тепловой машины:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

Умея точно измерять полученную работу A и израсходованное тепло, мы можем установить новый способ измерения температуры, который не будет зависеть от свойства определенного вещества.

Для этого нужно только выбрать одну какую-либо постоянную температурную точку (температуру нагревателя $T_н$) — пусть это будет точка замерзания воды — и условиться о размерах одного деления шкалы. Тогда уже просто построить с помощью тепловой машины всю температурную шкалу (для $T_х$), пользуясь величиной к.п.д. машины.

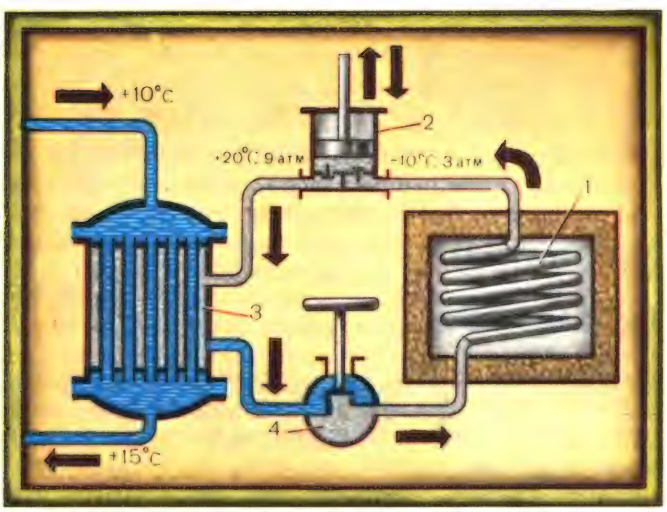


Схема холодильной установки: *1* — испаритель, размещенный в холодильной камере, окруженной слоем изоляции; *2* — компрессор, в котором за счет сжатия повышаются давление и температура охлаждаемого вещества; *3* — конденсатор, в котором охлаждаемое вещество отдает тепло циркулирующей воде, несколько повышая ее температуру; *4* — регулирующий вентиль, за которым рабочее вещество расширяется и температура его опять падает.

Такая шкала называется *термодинамической шкалой температур* или *шкалой абсолютных температур T*. Ее принято отсчитывать от абсолютного нуля и обозначать в кельвинах (К); она очень просто связана с температурой, измеренной в градусах Цельсия:

$$T = t + 273{,}15 \approx t + 273.$$

На практике, конечно, нет необходимости строить неосуществимую тепловую машину, чтобы использовать ее в малоподходящей для нее роли термометра.

Совершенно точно совпадает температура по термодинамической шкале с температурой, измеренной по изменению давления или объема идеального газа. А его с практически достаточной точностью можно заменить газом гелием, свойства которого очень близки к свойствам идеального газа.

Самый точный термометр наполнен гелием, и измерение температуры в нем производится по изменению давления при постоянном объеме. Такой термометр сложен, громоздок и неудобен. Он служит только эталоном для проверки обычных термометров.

Энтропия

Трудная глава

Мы уже знаем, как было открыто первое начало термодинамики. На опыте была обнаружена независимость разности поглощенного системой тепла и совершенной ею работы от того, какие круговые процессы происходили в системе. Это и стало доказательством того, что в мире существует замечательная величина, свойственная любой системе, любому веществу, любому телу,— *внутренняя энергия*. Она определяется только состоянием системы и не зависит от того пути, по которому система в это состояние пришла.

Запомним это и снова вернемся ко второму началу термодинамики.

Значение к.п.д. обратимой тепловой машины, работающей с любым веществом (т. е. величину, показывающую, какую долю затраченного тепла мы можем превращать в работу), можно выразить формулой:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н}.$$

Эта величина равна:

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н}, \text{ или } \frac{Q_н - Q_х}{Q_н} = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

В науке часто несложные, простые арифметические действия приводят к большим и важным выводам. Относитесь к ним с уважением — такие действия, несмотря на их простоту, иногда раскрывают большую научную перспективу.

Вам сейчас придется внимательно проследить за преобразованием выражения для к.п.д. Оно преобразуется очень просто. Конечно, это выражение можно переписать так:

$$1 - \frac{Q_х}{Q_н} = 1 - \frac{T_х}{T_н}.$$

Затем его можно упростить:

$$\frac{Q_х}{Q_н} = \frac{T_х}{T_н}.$$

Полученную пропорцию лучше переписать так:

$$\frac{Q_н}{T_н} = \frac{Q_х}{T_х}.$$

Не забывайте, что индексом «н» обозначены тепло, взятое у нагревателя, и его температура, а индексом «х» — тепло, отданное холодильнику, и, соответственно, его температура.

И наконец, можно написать:

$$\frac{Q_н}{T_н} - \frac{Q_х}{T_х} = 0.$$

Учтем, что мы условились считать тепло, которое система получает, положительным, а то тепло, которое она отдает,— отрицательным.

Ясно, что этот результат представляет собой алгебраическую сумму отношений теплоты и соответствующей температуры. Для обратимого цикла Карно эта сумма оказалась равной нулю:

$$\sum_{\odot} \left(\frac{Q}{T}\right) = 0.$$

В термодинамике принято говорить: *сумма приведенных теплот для обратимого цикла Карно равна нулю.*

Оказывается, что это справедливо и для любого обратимого, т. е. квазистатического, цикла, каким бы сложным он ни был. Это замечательный результат, один из наиболее важных для всего естествознания.

Из него сейчас же следует очень важный вывод: для любой системы и для любого незамкнутого процесса, каким бы он ни был, из скольких бы стадий ни состоял, обязательно должно существовать такое особое свойство системы, изменение которого при переходе из одного состояния в другое равно сумме приведенных теплот.

Это, конечно, не очень понятно; не так уж легко представить себе, о чем тут идет речь, а наглядно это свойство вообразить вряд ли удастся. Но тем не менее такое свойство действительно существует в

природе, оно играет важнейшую роль не только в в термодинамике, но и во всем естествознании, включая даже философию.

Это свойство принято обозначать буквой S. Его изменение при переходе системы из одного состояния в другое равно:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \sum_1^2 \frac{Q}{T}.$$

Открыл его немецкий ученый, знаменитый термодинамик Р. Клаузиус. Это уравнение носит его имя.

Обнаружив в природе новую, ранее не известную никому величину, Клаузиус назвал ее странным и непонятным словом «энтропия», которое сам и придумал. Он так объяснил его значение: «тропе» по-гречески означает «превращение». К этому корню Клаузиус добавил две буквы — «эн», так, чтобы получившееся слово было бы по возможности подобно слову «энергия». Обе величины настолько близки друг другу своей физической значимостью, что известное сходство в их названиях было целесообразно.

Открытие второго начала термодинамики позволило обнаружить в природе новое замечательное свойство — энтропию, подобно тому как первое начало термодинамики привело к открытию точного понятия «внутренняя энергия».

Можно ли обнаружить энтропию?

К сожалению, никак нельзя. Человек не обладает такими органами чувств, которые давали бы ему возможность «видеть» непосредственно, «много» или «мало» энтропии содержит система.

Но, пожалуй, ни сожалеть, ни удивляться по этому поводу не следует. Ведь мы, например, привыкли к «простому» понятию «энергия». Но до того, как раздастся выстрел, трудно судить по внешнему виду пороха в ружейном заряде, велик ли запас его внутренней энергии.

Зачем нужно понятие «энтропия»

Тоже трудная глава

Физики совсем недавно завершили синтез алмазов. Всего несколько лет назад ученые об этом только мечтали. Столько уже было в истории науки неудачных, бесплодных попыток!

Сверкающие драгоценные камни теперь не в сказке, а наяву растут в бронированной аппаратуре, под высоким давлением, при высокой температуре. На заводе синтетических алмазов могут быть теперь изготовлены самые настоящие алмазы, по своим свойствам не уступающие природным, и при этом столько, сколько их нужно технике. Разве это не подлинное чудо? Это замечательный пример того, как наука сумела осуществить сказочную мечту.

Технология синтеза алмаза трудна и сложна. Конечно, очень нелегко рассчитать и построить мощную и сложную аппаратуру. Непросто создать в ней нужное давление в десятки тысяч мегапаскалей (1 МПа $= 10^6$ Па). Очень трудно при этом поддерживать высокую температуру. Но все это легко и просто по сравнению с самой главной, с самой большой трудностью, по сравнению с основной проблемой — как узнать, при каких условиях, в каких реакциях углерод может приобретать форму алмаза. Это проблема теоретического расчета, без ее решения эмпирический поиск безнадежен. Если преодолена эта трудность, все остальное разрешимо.

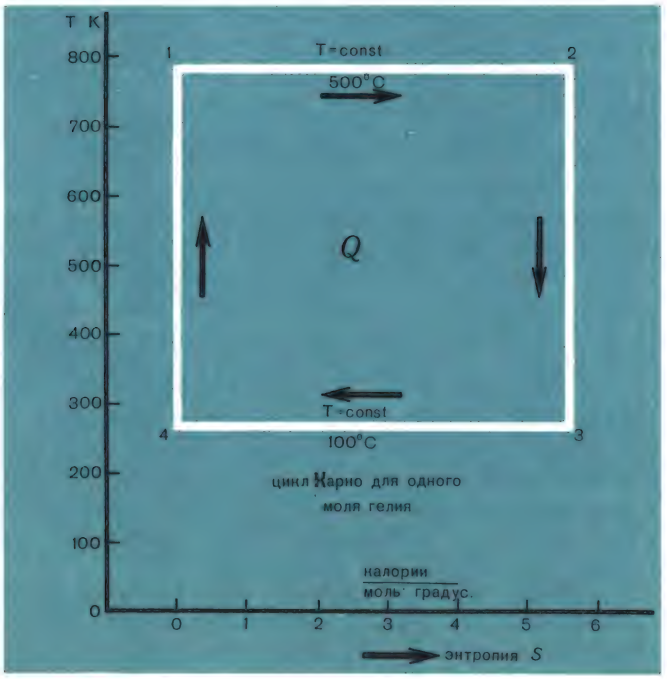
Проблема промышленного синтеза алмазов — пример типичной термодинамической задачи. Очень странные процессы использует термодинамика для своих расчетов. Квазистатический воображаемый процесс — это цепь *почти* равновесных состояний системы. Меняется квазистатический процесс на обратный — меняются на обратные и передачи теплоты и работы. Абсолютные их значения остаются прежними. После протекания обратимого процесса можно восстановить первоначальные состояния всех его участников — самой системы, источников тепла, источников работы — без каких-либо изменений в окружающей среде, т. е. в остальном мире. К обратимому, квазистатическому процессу предъявляются взаимно противоречивые требования: быть процессом и осуществлять равновесие, т. е. не быть процессом. Чтобы осуществить такой процесс, нужны идеальные условия, подобные тем, которые были установлены в цикле Карно.

Все реальные процессы, протекающие в действительности, нестатические — все они необратимы. Их нельзя по желанию провести в прямом и обратном направлении, не оставив никакого следа в окружающем мире. У всех изменений в природе есть определенное направление.

Термодинамика должна помочь исследователям заранее узнать, пойдет ли реальный процесс, не осуществляя его в действительности. Это и есть ее основная задача. Для этого нужно понятие «энтропия».

Энтропия — это свойство системы, которое полностью определяется состоянием системы. Какими бы путями ни перешла система из одного состояния в другое, изменение ее энтропии будет всегда одно и

Применение понятия «энтропия» значительно упрощает сложные расчеты. Вот, например, как просто изображается в координатах T — S (температура — энтропия) тот же самый цикл Карно для одного моля идеального газа, который представлен на рисунке, стр. 139, схема *II*. В теплотехнике такой способ изображать циклы тепловых машин общепринят. Он очень удобен. В этом случае площадь цикла соответствует теплоте, полученной системой.



то же. Но вычислять изменение энтропии термодинамика умеет и может только на квазистатических, обратимых путях. В этом случае изменение энтропии точно равно сумме приведенных теплот:

$$S_2 - S_1 = \sum \left(\frac{Q}{T}\right).$$

Если же в системе происходили необратимые, нестатические процессы, если в ней протекали процессы теплопередачи при конечных разностях температуры, процессы, связанные с трением, любые реальные процессы, а начальное и конечное состояния при этом были теми же самыми, то изменение энтропии будет обязательно точно таким же, но сумма приведенных теплот в необратимом процессе уже не будет равна изменению энтропии.

Вот поэтому-то термодинамика рассматривает и изучает придуманные, несуществующие квазистатические процессы. Они дают возможность рассчитать и определить изменение энтропии для реальных процессов, для которых непосредственно сделать это нельзя.

Зачем ученому нужно знать энтропию

Во всех реальных процессах, при которых система может любым необратимым путем самостоятельно переходить из одного состояния в другое, общая энтропия всех участников процесса может только возрастать.

Это и дает возможность исследователю заранее предсказать, как пойдет неизвестный процесс, заранее предвидеть, при каких условиях ему удастся заставить еще не изученную на опыте реакцию пойти в нужном направлении. Для этого ученому необходимо иметь сведения об энтропии *всех* участников процесса, включая источники теплоты.

Химическая реакция, как и любой другой процесс, связана с работой (в результате реакции могут выделяться или поглощаться газообразные вещества или изменяться объемы реагирующих веществ и, следовательно, может совершаться работа расширения или реакция может протекать в химическом источнике тока и совершать электрическую работу и т. п.).

Химическая реакция, как и любой другой процесс, всегда сопровождается обменом тепла с окружающей средой. Если реакция идет только с поглощением тепла, систему нужно нагревать. Если тепло выделяется — охлаждать.

Для проведения расчета очень удачно то, что энтропия источников работы не может изменяться. Ведь в понятие «работа» не входят ни теплота, ни температура. Это очень сильно упрощает расчет энтропии.

Изменение энтропии источников теплоты нужно обязательно учитывать, хотя это и усложняет задачу.

Если реакция, как и любой процесс, может быть проведена обратимо, то расчет изменения энтропии прост. В качестве примера можно рассмотреть любой изотермический процесс (испарение, плавление, изотермическое расширение). В этом случае существует кроме системы только один источник тепла. Их температуры *одинаковы*. Тепло, поглощенное системой, отдано источником (нагревателем). Насколько увеличилась энтропия системы, настолько же уменьшилась энтропия источника. Общее изменение энтропии равно нулю.

Это очень важное заключение справедливо для любых процессов, в которых участвует любое количество источников теплоты, если только эти процессы квазистатические — обратимые. Можно высказать общее положение: *в любом обратимом процессе общее изменение энтропии равно нулю*. Справедливо и обратное положение: *если общее изменение энтропии равно нулю, то процесс обратимый*. Такая зависимость очень важна. Она и позволяет ученому не наблюдать за процессом при всех условиях. Ему достаточно знать только начальное и конечное состояния системы и источников теплоты, и он смо-

жет судить, был ли этот процесс обратимым или нет.

Обратимый процесс в сущности никуда не идет, никуда не направлен. Это цепь равновесных состояний. Реальный, необратимый, нестатический процесс такой особенностью не обладает именно потому, что он неравновесный, он самопроизвольно идет только в одну сторону. Только в том направлении может идти реальный процесс, в котором общая энтропия, т. е. энтропия системы вместе с энтропией всех источников теплоты, может только возрастать. Обратное положение тоже справедливо: если общая энтропия возрастает, то процесс необратим и может самопроизвольно протекать в нужном направлении.

Если расчет приводит к результату, согласно которому общая энтропия уменьшается, то процесс невозможен. В данном направлении он не пойдет. Всякие попытки осуществить такой процесс будут абсолютно безнадежны. Этот энтропийный принцип широко используется в науке и технике, и в первую очередь в химии и химической технологии, для суждения о том, можно ли осуществить нужную химическую реакцию или получить нужное вещество.

Для облегчения таких расчетов, часто очень сложных, существуют специальные справочные издания, в которых собраны в таблицы заранее рассчитанные значения энтропии различных химических соединений.

Как же вычислить энтропию?

Вычислить вообще энтропию системы, энтропию любого тела нельзя, точно так же, как нельзя вообще определить его энергию. Вычислить можно только изменение энтропии при переходе системы из одного состояния в другое, если этот переход провести квазистатическим путем. Расчет этот по существу прост, правда, из-за недостатка экспериментальных данных часто он становится сложным и трудным, а иногда и невозможным. Чтобы вычислить энтропию, нужны точные измерения теплоемкостей и тепловых эффектов, необходимо также знать уравнение состояния.

Чтобы получить понятие о том, как в простейшем случае рассчитывается энтропия, полезно внимательно рассмотреть график, на котором приведен расчет изменения энтропии воды.

Специального названия для единиц, в которых измеряют энтропию, не придумано. Ее измеряют в $\frac{\text{кал}}{\text{моль}\cdot{}^\circ\text{C}}$ или в $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$.

Что такое энтропия?

Много было дано ответов на вопрос, что такое энтропия, но ни один из них не может быть назван полностью удовлетворительным. Самый точный ответ такой: *изменение энтропии — это сумма приведенных теплот в обратимом процессе.* Ясно? Для специалиста-термодинамика ясно и достаточно. Нам же, пожалуй, стоит познакомиться еще с одним определением энтропии.

Вернемся к циклу Карно. Из всего тепла $Q_н$, как мы знаем, в работу можно превратить не больше чем $Q_н \quad Q_х$. Тепло, отданное холодильнику, при данных температурах нагревателя и холодильника в работу уже не превратишь! Оно для нас потеряно, пропало без пользы. Сосчитать, сколько же такого обесцененного тепла, нетрудно. Не меньше чем

$$Q_х = \frac{Q_н}{T_н} \cdot T_х.$$

Но величина $\frac{Q_н}{T_н}$ — это не что иное, как изменение энтропии нашего работающего в цикле вещества при получении им тепла от нагревания:

$$\frac{Q_н}{T_н} = \Delta S.$$

Следовательно, потерянное для нас бесполезно тепло, которое мы не можем превратить в работу, будет:

$$Q_х = T_х \Delta S.$$

Это помогает нам дать еще одно определение энтропии, не такое строгое и точное, но чуть-чуть более наглядное: *энтропия — это мера обесцененной энергии*, бесполезной энергии, *которую нельзя использовать для получения работы.*

Так что же такое энтропия?

Как вы думаете, что произойдет, если кусок сахара положить в стакан горячего чая? Нет, это не шутка, это очень важный вопрос. Ответ на него, очевидно, всем известен. Сахар растворится, чай станет сладким. Но молекулы сахара, участвуя в тепловом движении при температуре горячего чая, могут беспорядочно двигаться в стакане куда угодно, и, в частности, любая из молекул может рано или поздно оказаться у дна стакана. В этом нет и не может быть сомнения.

Но если каждая из молекул способна на это, то почему бы им всем сразу не собраться одновременно на дне стакана, да так, чтобы снова возник бы из

воды растворившийся в ней кусок сахара. Возможно это или нет? Конечно нет. Но почему?

Раскаленный конец кочерги, вынутой из печи, быстро остывает на воздухе. При этом воздух нагревается, возрастает средняя скорость его молекул. В воздухе, находящемся в термическом равновесии, существуют молекулы с разной энергией, среди них есть и очень быстрые, «горячие» молекулы. Их распределение и направление их движения беспорядочны. Каждая из таких молекул может оказаться в любом месте. Может быть, стоит подождать, пока холодная кочерга снова раскалится под ударами таких быстрых молекул? Почему бы им не собраться «случайно» всем в одном месте и не нагреть холодный металл? Возможно это? Конечно нет. Но почему?

Продырявленный футбольный мяч шипит и «испускает дух» — опадает. Но ведь молекулы воздуха движутся беспорядочно во все стороны, совершая тепловое движение. Почему бы им совершенно «случайно» не начать двигаться в одну и ту же сторону, так, чтобы дырявый мяч сам собой снова надулся? А это возможно? Ну конечно нет! Но почему?

Почему нельзя обратить явление диффузии? Почему необратимо явление теплопроводности? Почему не может само собой повыситься давление газа? И почему всегда «сами собой» идут обратные процессы выравнивания температур, выравнивания давлений, выравнивания концентраций? Все они связаны с возрастанием энтропии системы. Что это значит?

С точки зрения молекулярно-кинетических представлений все это объясняется довольно просто и наглядно: *любая система стремится перейти из менее вероятного состояния в более вероятное.*

Наиболее вероятное распределение молекул газа — это равномерное распределение по объему. Наиболее вероятное распределение скоростей молекул — это также совершенно определенное равномерное распределение в разных частях системы. Если в системе появятся отклонения в концентрации, температуре или давлении, то возникнут самостоятельно идущие процессы выравнивания, и они снова приведут систему в состояние равновесия — в наиболее вероятное состояние.

Чтобы лучше понять, что такое термодинамическая вероятность данного состояния газа, нужно перечитать в томе 2 ДЭ в статье «Наука о случайности» главу о вероятности. В термодинамике вероятностью данного состояния системы называют общее число способов, которыми можно это состояние осуществить, переставляя одну молекулу на место другой.

Людвиг Больцман (1844—1906)

Австрийский физик, член Венской академии наук и многих академий мира. Самыми важными работами Больцмана являются классические исследования по кинетической теории газов и статистическому истолкованию второго начала термодинамики, которые нанесли удар по идеалистической теории тепловой смерти Вселенной. Из экспериментальных работ известны его опыты по определению диэлектрических постоянных газов и кристаллических твердых тел. В 1884 г. Больцман, используя теорию Максвелла, теоретически вывел закон Стефана (так называемый закон Стефана — Больцмана) и тем самым заложил основы современной теории излучения. Больцман проявлял большой интерес к философии, стоял на позициях стихийного материализма, активно боролся против махизма. В. И. Ленин положительно отзывался о философских взглядах Больцмана.

Связь между вероятностью данного состояния системы и ее энтропией была установлена двумя знаменитыми учеными — Д. Гиббсом и Л. Больцманом. На простом примере это можно легко показать. Известно, что энтропия любого вещества пропорциональна его массе. Это значит, что энтропия всей системы равна сумме энтропий ее отдельных частей.

Разделим вещество на две части, тогда очевидно, что

$$S = S_1 + S_2.$$

По законам теории вероятности вероятность данного состояния всей массы вещества равна произведению вероятностей его отдельных частей:

$$w = w_1 \cdot w_2.$$

Таким образом, суммированию энтропий соответствует умножение термодинамических вероятностей состояния отдельных частей. Из всех математических функций такими свойствами обладают только логарифмы.

Таким образом, *энтропия должна быть пропорциональна логарифму термодинамической вероятности:*

$$S = k \ln w.$$

В этой формуле $k = \frac{R}{N_A}$, где R — газовая постоянная, N_A — число Авогадро.

Следовательно, энтропия системы определяется вероятностью ее состояния. Это очень важно.

Большой самостоятельный раздел науки — *статистическая термодинамика,*— в основе которого лежит представление о статистической природе энтропии, достиг замечательных успехов. Химикам во многих случаях теперь не нужно проводить долгие, трудные и дорогие эксперименты. Они могут рассчитывать нужные им реакции, хорошо изучив молекулярные спектры интересующих их соединений.

Стоит специально изучить эту новую, правда, трудную, но интересную и увлекательную науку даже только для того, чтобы понять, как же это оказалось возможным, изучая свет, рассчитывать и строить химические заводы.

Третий закон термодинамики

Третий закон — основной закон термодинамики. Он был открыт в результате исследований в области низких температур.

Открытие второго начала термодинамики подтвердило, что существует *абсолютный нуль температуры,* предсказанный еще Ломоносовым, первым исследователем низких температур, впервые сумевшим заморозить ртуть и искусственно получить очень низкую температуру (—65° С).

Из уравнения второго начала термодинамики

$$\eta = \frac{A}{Q_н} = \frac{T_н - T_х}{T_н}$$

следует, что возможно существование такой предельно низкой температуры, при которой все тепло $Q_н$, взятое от нагревателя, может быть полностью превращено в работу. Как видно из уравнения, это осуществимо только при $T_х = 0$. Это и есть термодинамическое определение абсолютного нуля.

Энтропийный метод расчета направления термодинамических процессов обладает существенным недостатком. Как мы уже знаем, чтобы рассчитать возможность любого процесса, нужно знать как изменение энтропии системы, так и изменение энтропии источников теплоты — и тех, от которых система получает тепло, и тех, которым это тепло отдает.

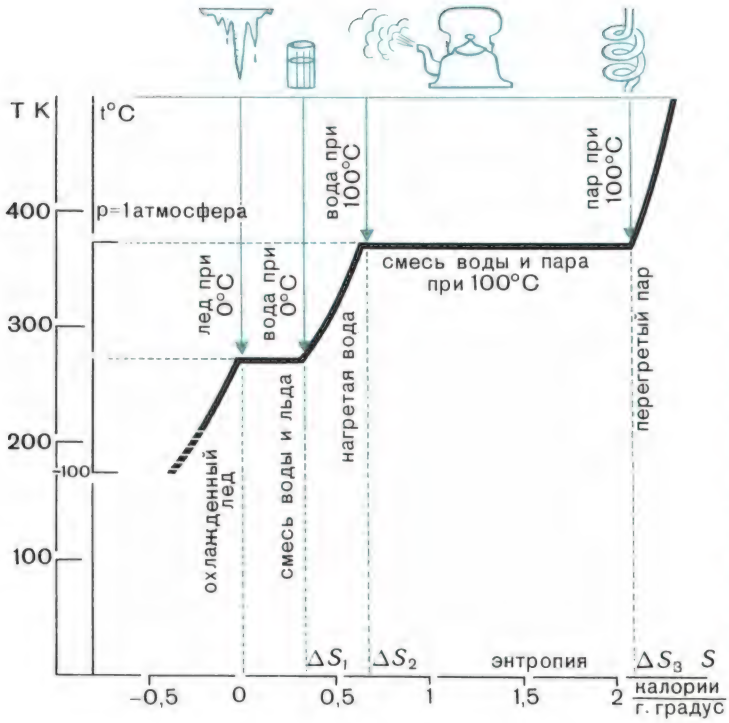
Но изменение энтропии системы часто бывает очень трудно определить, а иногда даже совсем невозможно. Такой расчет ведь может быть проведен только с помощью обратимого процесса. А для этого нужно знать, при каких условиях изучаемая система может находиться в равновесии.

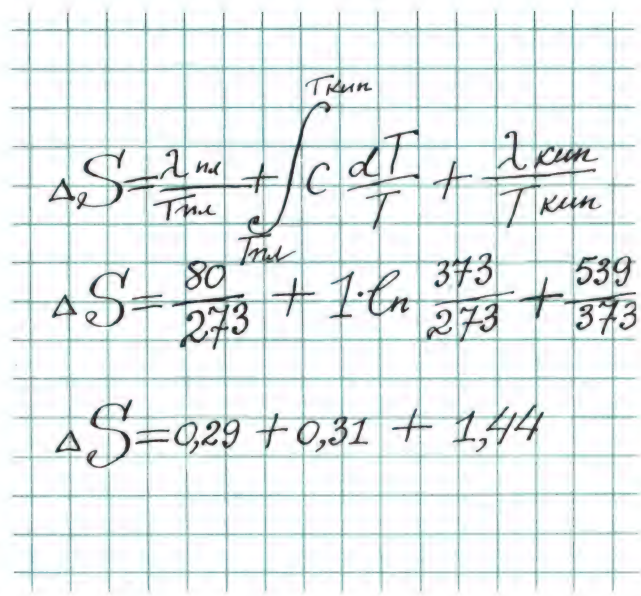
Те исследователи, которые захотели бы на основании только одного второго начала термодинамики рассчитать процесс получения алмазов, должны были бы экспериментально, на опыте изучить, при каких условиях графит находится в равновесии с алмазом, подобно тому как лед с водой. Затем им пришлось бы осуществить при этих условиях превращение графита в алмаз, измерив теплоту превращения. А это практически невозможно.

Необходимость экспериментально определить условия равновесия очень снижает ценность энтропийного принципа, но, конечно, не обесценивает его. Зная изменение энтропии при одних условиях, можно рассчитать его при любых других значениях температуры и давления. Такие энтропийные расчеты — главное содержание большой самостоятельной науки — *химической термодинамики.*

Вычисляя изменение энтропии, нельзя обойтись одним вторым началом без того, чтобы на опыте не изучить равновесное состояние при каких-либо определенных условиях. Эта большая принципиальная трудность была термодинамикой преодолена. Изучение поведения вещества вблизи абсолютного нуля, в области очень низких температур, и теоретические исследования теплоемкости тел на основе квантовой теории привели к установлению еще одного — третьего закона термодинамики, который впервые был высказан известным немецким физико-химиком В. Нернстом.

Рассмотрим на примере воды, как надо рассчитывать энтропию. Прежде всего нужно выбрать начальное состояние системы. Пусть это будет состояние льда при 0°С. Во всех процессах, протекающих при постоянной температуре, изменение энтропии находится очень просто — оно равно приведенной теплоте обратимого процесса Q/T. Это справедливо и для плавления льда, и для испарения воды. Для нагревания воды расчет усложняется: ее температура при нагревании от 273 К до 373 К изменяется непрерывно. Поэтому приходится суммировать бесконечно малые изменения энтропии. Для вычисления энтропии нужно знать теплоемкость и теплоту превращений. Теплоемкость воды $C=1$ калории на грамм при изменении температуры на 1 градус. Для воды теплота плавления равна 80 калориям на грамм. Теплота испарения при 100°С 539 калорий на грамм. Точный расчет энтропии очень громоздок и труден. Приходится учитывать, как влияет на изменение теплоемкости не только изменение температуры, но и изменение давления.





Согласно третьему закону, *по мере приближения температуры любого тела к абсолютному нулю изменение его энтропии при изменении его любого свойства тоже стремится к нулю и становится предельно равным нулю при достижении абсолютного нуля*. Хотя эта формулировка и звучит подобно детской скороговорке, она выражает очень важный закон природы. Знание его сильно повысило возможность термодинамического предсказания:

$$S_2 - S_1 \underset{T \to 0}{\longrightarrow} 0.$$

Это математическое выражение третьего закона позволяет полностью рассчитать химическую реакцию, не проводя никаких предварительных экспериментальных исследований химического равновесия. Решая проблему синтеза алмаза, исследователи были освобождены благодаря третьему закону от необходимости предварительно изучить хотя бы одно равновесие между алмазом и графитом. Раз и навсегда для любой системы, а следовательно и для алмаза, стало известным изменение энтропии при абсолютном нуле, хотя, как мы знаем, он недостижим.

На этом примере мы рассмотрим, как решается термодинамикой расчет возможности осуществить новое, неизвестное химическое превращение.

В основе расчета теперь лежит знание, как изменяется энтропия при переходе графита в алмаз при абсолютном нуле. По третьему закону это изменение равно нулю. Зная теплоемкости графита и алмаза в пределах от абсолютного нуля вплоть до высоких температур, всегда можно вычислить, как изменяется энтропия при превращении графита в алмаз при любой температуре.

По уравнению состояния графита и алмаза можно вычислить изменение энтропии и для любого давления.

Далее нужно еще знать теплоту перехода графита в алмаз (чтобы вычислить изменение энтропии источника теплоты). Ее можно найти, измерив теплоту сгорания и графита и алмаза. Из этих данных, по закону Гесса, легко найти теплоту перехода, нужную для расчета.

По известным теплоемкостям и уравнению состояния можно пересчитать теплоту перехода от ее значения при обычных условиях на любые значения температуры и давления.

Таким путем и могут быть получены все данные, необходимые для того, чтобы можно было предсказать условия, при которых возрастает общая энтропия в процессе превращения графита в алмаз, при которых может, следовательно, происходить самопроизвольное образование алмаза.

Этот термодинамический расчет требует предварительных точнейших исследований теплоемкостей, точного знания уравнений состояния в очень широких пределах температуры и давления. Но такой термодинамический расчет был проведен советскими исследователями, и этот расчет полностью оправдался. В СССР был с успехом осуществлен промышленный синтез алмазов. Без термодинамики это было бы невозможно.

Полмиллиарда уравнений

Термодинамика основана всего на четырех законах (закон термического равновесия, о котором рассказано в начале статьи, тоже является одним из основных законов термодинамики). Эти законы представляют собой обобщение огромного опыта, накопленного наукой в течение столетий.

Пользуясь могучим аппаратом математики, и в первую очередь методами дифференциального исчисления, термодинамика устанавливает связи между самыми разнообразными явлениями и процессами. Ее всеобщие законы приложимы ко всем отраслям физики и химии: к свойствам газов, жидкостей и твердых тел, к химическим реакциям, к магнитным и электрическим явлениям. Они приложимы к грандиозным космическим процессам, изучаемым астрофизикой. Ее выводы неоспоримы и незыблемы.

Один известный ученый подсчитал общее число уравнений, которые могут быть получены термодинамикой: их число оказалось невообразимо большим — свыше 500 млн. уравнений. А ведь каждое из них отражает реальную закономерность, действительную связь между свойствами вещества, между явлениями, протекающими в нашем реальном мире. Без термодинамики не было бы и не могло бы быть современной теплотехники, не было бы химической промышленности, не было бы металлургии, не существовала бы, в частности, и промышленность удобрений. Синтез аммиака из водорода и азота, синтез искусственного жидкого топлива, синтез алмазов — во всем этом проявилась мощь термодинамики. В совокупности знаний, без которых нельзя вывести на орбиту космический корабль, термодинамика занимает важное место.

Без помощи термодинамики не может обойтись ни одна область естествознания, ни одна точная наука. В области своего применения термодинамика обладает такой большой возможностью предсказания, что по справедливости может быть названа «грядущего вестником». Тот, кто знает и любит термодинамику, овладел ее методами и научился их применять, поистине может быть назван современным кудесником.

Термодинамику должен изучить каждый, кто любит науку, какой бы из отраслей знаний он ни собирался посвятить свою жизнь.

Тайна вихря

Страшен смерч в океане. Вихрем до самого неба поднимает воду из морской пучины. Беда, если неосторожный капитан не успеет увести свой корабль с его пути. Еще страшнее смерч в пустыне. Гигантские воздушные вихри несут горы горячего песка, вырывают с корнем деревья, разрушают дома, могут унести из каравана путника вместе с верблюдом. По древней легенде храбрец, повстречавший в пустыне смерч на своем пути, должен смело к нему подскакать и, не дрогнув, метнуть в него кинжал: смерч исчезнет, а на стальном лезвии останутся капли холодной росы — это «кровь шайтана», пораженного смелым воином. Удивительно, как часто скрывается истина в старых поэтических легендах. Может быть, сотни лет знали жители пустынь о сильном холоде в середине вихревого столба смерча. Но ученые-физики сумели подметить это замечательное явление совсем недавно. Оказывается, во всяком воздушном вихревом движении температура наружных слоев вихря выше, чем в окружающем воздухе, а в центре значительно ниже. И хотя до сих пор теоретики еще не смогли до конца понять и объяснить причину этого эффекта и его механизм далеко не ясен, инженеры заставили «шайтана смерчей пустыни» послушно работать в холодильных установках.

На подступах к абсолютному нулю

Что такое холод

Состояние и свойства вещества зависят от его температуры. Например, вода при температуре ниже 0° С — это твердое тело, при 100° С и нормальном атмосферном давлении она превращается в пар, а при десятках тысяч градусов Цельсия — в плазму.

Температура определяется скоростью теплового движения молекул и атомов. Чем быстрее они двигаются, тем выше температура вещества. Когда тепловое движение частиц затихает, вещество охлаждается. Если же тепловое движение совсем прекратится, дальнейшее понижение температуры станет, очевидно, невозможным. Такую наинизшую температуру называют абсолютным нулем и принимают ее за начало отсчета в термодинамической шкале температур. Термодинамическая температура по этой шкале определяется в единицах, носящих имя английского физика У. Кельвина (см. ст. «Всему миру — одну меру»). По размеру градус термодинамической шкалы — кельвин (К) и градус Цельсия (° С) между собой равны. Соотношение между температурой в кельвинах (T) и температурой в градусах Цельсия (t) следующее: $T = t + 273{,}15$. Температура таяния льда равна 273,15 К, или 0° С, а температура кипения воды (при атмосферном давлении) 373,15 К, или 100° С (рис. 1); комнатной температуре 20° С соответствует 293,15 К.

Повседневный опыт убеждает нас в том, что при контакте двух тел с разной температурой тепло самопроизвольно переходит от более нагретого тела к менее нагретому и температуры обоих тел постепенно выравниваются. Передача тепла от менее нагретого тела к телу с более высокой температурой никогда не происходит самопроизвольно. Чтобы осуществить такую передачу, надо затратить энергию — механическую, электрическую, химическую или еще какую-нибудь другую. Чем ниже температура охлажденного тела, тем больше нужно затратить энергии для ее дальнейшего снижения. Особенно велика затрата энергии на охлаждение вблизи абсолютного нуля (0 К). Чтобы охладить тело на температурном уровне 3 К (—270° С), нужно выполнить в 1000 раз больше работы, чем для такого же охлаждения его при температуре 270 К (—3° С). При абсолютном же нуле затрата энергии для дальнейшего охлаждения тела должна быть равна бесконечности. Это, кстати, показывает, что охладить тело точно до 0 К вообще невозможно.

Свойства многих тел при понижении температуры меняются. Мягкая и упругая резина при температуре около —200° С становится жесткой и от удара молотком раскалывается, как стекло. Так же ведут себя многие металлы: железо, сталь, свинец становятся хрупкими. Свинцовый колокольчик, охлажденный в жидком азоте, издает мелодичный звон. Но есть металлы и сплавы, хрупкость которых не увеличивается с понижением температуры. Таковы, например, медь и ее сплавы, алюминий. Из этих металлов и изготовляют аппаратуру, работающую при очень низких температурах.

Газ превращается в жидкость

Для испарения любой жидкости к ней надо подвести тепло (его называют теплотой испарения). Испарение жидкого азота, жидкого водорода или жидкого гелия происходит при низких температурах. Поэтому тело, от которого будет взято тепло для испарения жидкого газа, охладится до низкой температуры этого газа. В жидком азоте тело можно охладить до 77 К, в жидком водороде — до 21 К.

Испаряя жидкий гелий в вакууме, можно получить температуру всего на 0,7 К выше абсолютного нуля. Еще более низкую температуру (до 0,3 К) дает сжиженный легкий изотоп гелия ^{3}He.

Чтобы охладить какой-либо предмет до нужной температуры, достаточно поместить его в ванну с соответствующим сжиженным газом. Таким образом, основная задача при получении очень низких температур — это *сжижение газов*. Его можно добиться двумя методами.

Первый метод — *дросселирование*, т. е. расширение сжатого газа без совершения работы при прохождении через дроссельный вентиль. При таком расширении молекулы газа преодолевают силу взаимного притяжения, их тепловое движение замедляется, и газ охлаждается.

Этот метод применяется в простейших установках для сжижения газов. Газ сжимают компрессором, затем охлаждают в теплообменнике и расширяют с помощью дроссельного вентиля. При таком расширении часть газа сжижается.

У каждого газа есть определенная температурная точка — так называемая *инверсионная температура*. Если температура газа выше инверсионной, то газ при дросселировании будет нагреваться. Поэтому, чтобы газ сжижался при дросселировании, его надо предварительно охладить ниже инверсионной температуры. Для большинства газов инверсионная

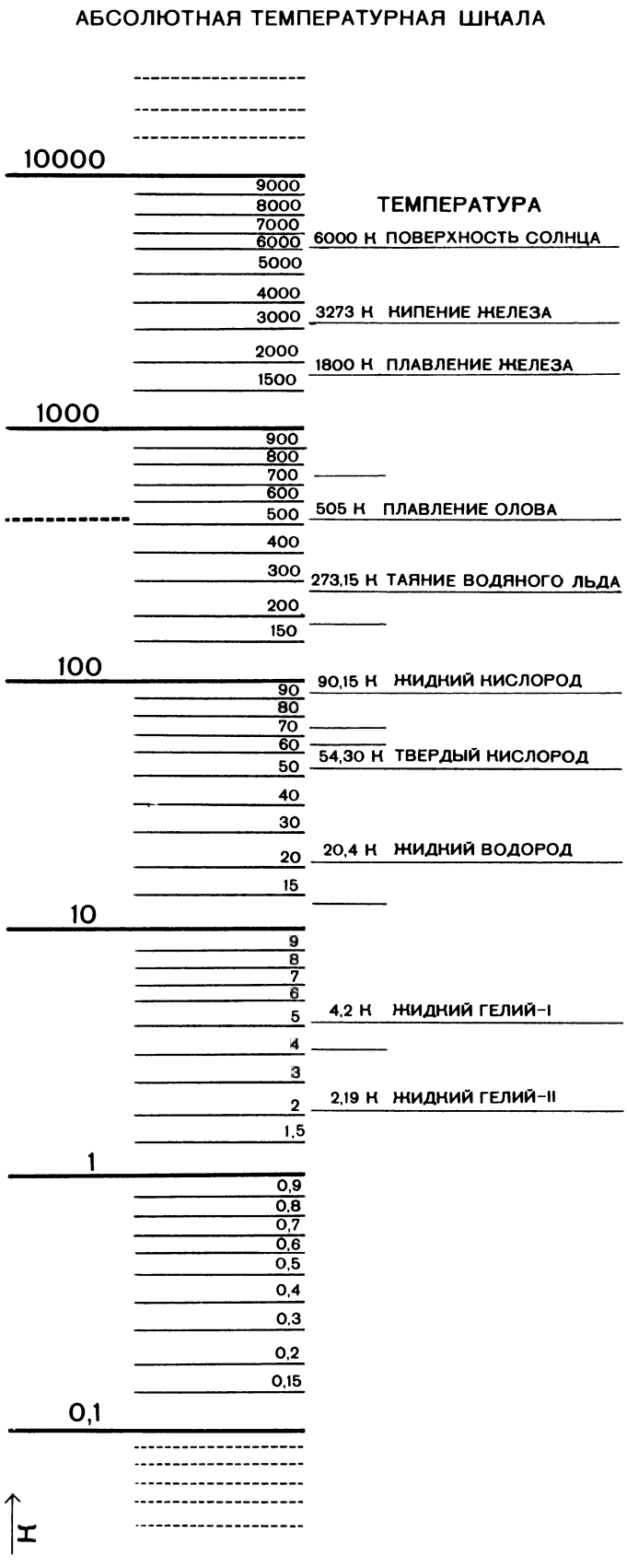


Рис. 1. Абсолютная температурная шкала.

температура выше комнатной, но у водорода она равна 193 К (—80° С), а у гелия даже 23 К (—250° С).

При другом способе охлаждения сжатый газ заставляют не только расширяться, но и совершать механическую работу в поршневом двигателе или в газовой турбине. Молекулы газа, ударяясь о поршень или о лопатки турбин, передают им свою энергию: скорость молекул сильно снижается и газ интенсивно охлаждается. Работа же расширяющегося газа передается электрическому генератору и может быть полезно использована.

Расширительные машины, применяемые при этом способе, называются *детандерами*. Они могут быть поршневого или турбинного типа. *Турбинный детандер* (турбодетандер) с высокой эффективностью расширения был создан советским ученым, академиком П. Л. Капицей. Эта машина сейчас широко используется во всем мире в установках для сжижения и разделения воздуха.

На рисунке 2 показано, как устроен аппарат для сжижения гелия с поршневым детандером. В аппарат из компрессора поступает гелий, сжатый при комнатной температуре до давления около 2 МПа (20 атм.). Сжатый гелий предварительно охлаждается в теплообменниках и в ванне с жидким азотом. После этого большая часть сжатого гелия расширяется в поршневом детандере, а гелий, оставшийся сжатым, охлаждается холодным газом до 11—12 К в теплообменниках и расширяется с помощью дроссельного вентиля. При этом часть газа превращается в жидкость и скапливается в сборнике. Гелий, оставшийся в газообразном состоянии, направляется в теплообменники для охлаждения следующих порций газа, нагревается до комнатной температуры и вновь сжимается компрессором. Таким путем сжижается примерно 10% подаваемого в аппарат гелия. Для теплоизоляции от окружающей среды все холодные узлы аппарата помещены в герметичный кожух — своеобразный термос, в котором поддерживается высокий вакуум.

Жидкий гелий — бесцветная легкая жидкость, плотность которой примерно в 8 раз меньше, чем плотность воды. Он кипит под атмосферным давлением при температуре около 4 К. Его используют в лабораториях для охлаждения исследуемого вещества до температуры, близкой к абсолютному нулю.

Водород, азот и другие газы сжижают теми же методами, но, соответственно, при более высокой температуре. Например, водород превращается в жидкость при температуре —252° С, азот при —196° С, метан при —161° С.

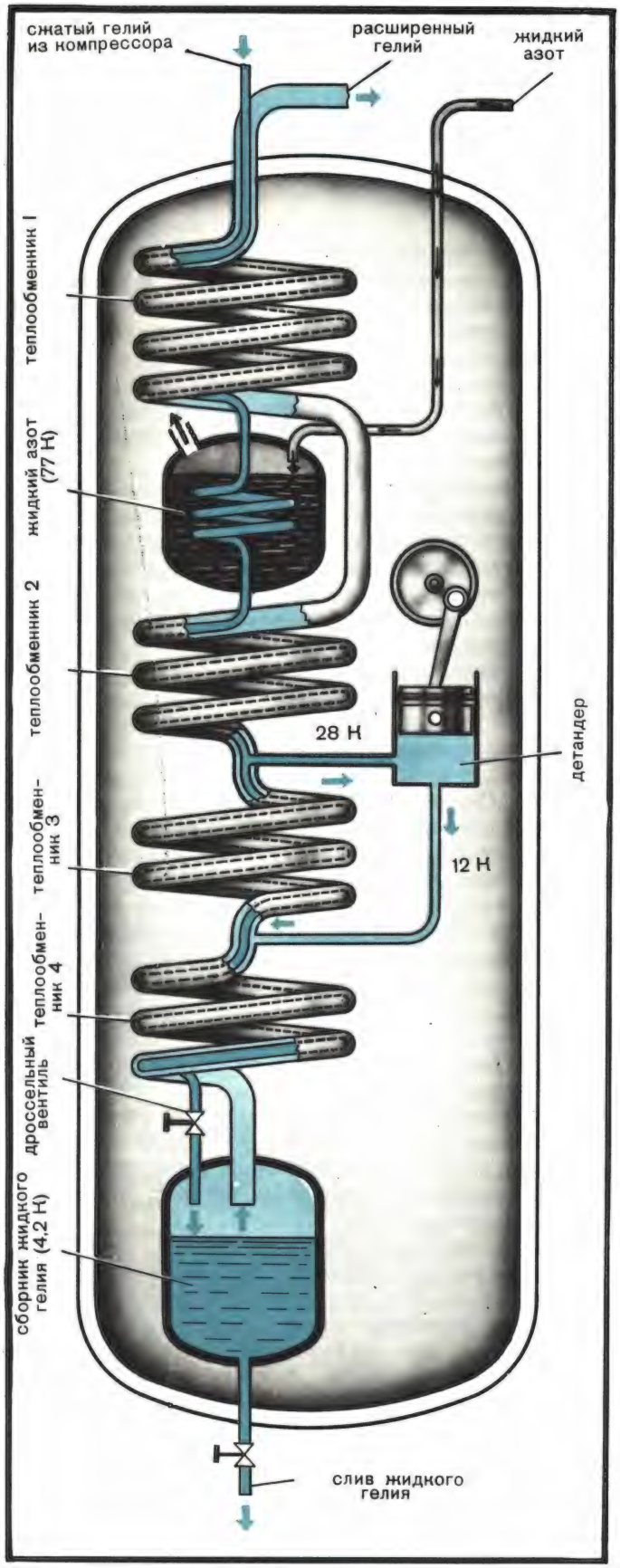


Рис. 2. Устройство аппарата для сжижения гелия.

Квантовые свойства веществ

Исследования при низких температурах привели к открытию двух удивительных явлений — сверхпроводимости и сверхтекучести. Оба эти явления весьма отличаются от свойств, которыми обладает вещество при обычных температурах, и могут быть объяснены только с помощью квантовой механики.

Один из основных законов квантовой механики — это представление о *дискретном*, т. е. прерывистом, характере физических процессов в природе. В частности, энергия любого вида, в том числе и тепловая, может передаваться лишь определенными, очень малыми порциями — *квантами*. Только квантовая механика может объяснить некоторые явления в микромире: свойства молекул и атомов, движение электронов, устойчивость ядер.

Законам квантовой механики должны подчиняться и многие явления в веществах — в газах, жидкостях и твердых телах. При обычных температурах из-за интенсивного теплового движения частиц квантовые свойства вещества не могут быть обнаружены. С понижением температуры интенсивность теплового движения частиц и их энергия уменьшаются и квантовые свойства вещества начинают отчетливо проявляться.

Сверхпроводимость

Способность металлов проводить электричество обусловлена свободными электронами, которые перемещаются между атомами кристаллической решетки. Под действием электрического поля электроны перемещаются в определенном направлении, и в проводнике возникает ток. Но между свободными электронами и кристаллической решеткой существует трение. Это и есть электрическое сопротивление металла.

Сопротивление во многом зависит от состояния кристаллической решетки. При высокой температуре геометрическая правильность решетки существенно нарушена тепловым движением атомов. С понижением температуры эта правильность решетки восстанавливается и способствует уменьшению сопротивления. При очень низких температурах сопротивление достигает остаточного значения, кото-

Рис. 3. Электрическое сопротивление ртути при низких температурах. При температуре 4,12 К сопротивление резко падает до нуля.

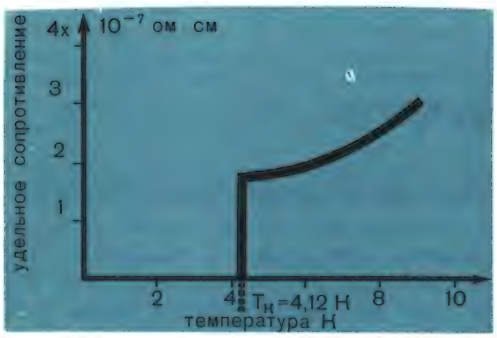


Рис. 5. Диаграмма сверхпроводящего перехода олова (1 Э=79,5775 А/м).

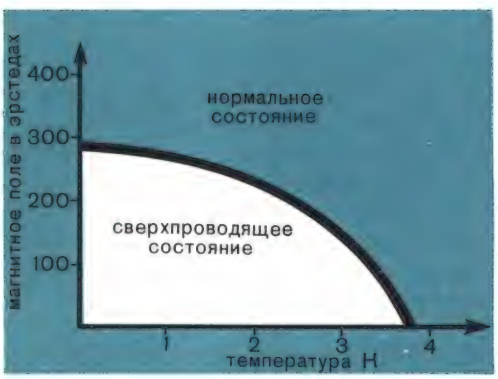


Рис. 4. Плавающий сверхпроводящий шарик над сверхпроводящим кольцом с незатухающим током.

рое почти не зависит от температуры и обусловлено наличием примесей и дефектами кристаллической решетки.

В 1911 г. голландский физик Г. Камерлинг-Оннес открыл удивительное явление: при температуре 4,12 К у ртути внезапно исчезает электрическое сопротивление (рис. 3). Вначале предполагали, что какое-то сопротивление в ртути все же остается и его просто не могут измерить. Но и самые чувствительные приборы не обнаружили сопротивления. Это физическое явление назвали *сверхпроводимостью*.

Сверхпроводимость прекрасно иллюстрируется таким опытом. Кольцо из какого-либо сверхпроводящего металла охлаждают жидким гелием. В кольце наводится одним импульсом магнитного поля электрический ток, и этот ток не исчезает до тех пор, пока поддерживается в металле низкая температура.

Существование незатухающих токов подтверждают и другие поразительные эксперименты. Опишем один из них. На кольцо, в котором течет незатухающий ток, опускается сверхпроводящий шарик. Магнитное поле кольца индуцирует ток того же направления на поверхности шарика. Так как сопротивление у шарика также равно нулю, индуцированный ток в нем не затухает. Магнитные поля токов кольца и шарика взаимно отталкивают их друг от друга. И вот шарик плавает над кольцом: отталкивающая сила преодолевает действующую на него силу тяжести (рис. 4).

Таким образом, при так называемой критической температуре некоторые металлы скачкообразно переходят в состояние сверхпроводимости, при котором полностью отсутствует электрическое сопротивление. В дальнейшем было открыто, что сверхпроводимостью обладает не только ртуть, но и некоторые другие металлы, например олово, свинец, цинк, алюминий. К 1972 г. сверхпроводимость обнаружена у 26 элементов.

В последние годы ученые обнаружили, что сверхпроводимость возникает и в некоторых сплавах, составные части которых сами по себе не обладают таким свойством. Таковы сплавы висмута с натрием, с калием. В настоящее время сверхпроводимость обнаружена более чем у 500 сплавов и соединений. Критические температуры перехода в

сверхпроводящее состояние образуют интервал почти в два десятка кельвинов: 18 К — для химического соединения Nb_3Sn и 0,14 К — для иридия.

Сверхпроводящие металлы при температуре ниже критической становятся идеальными диамагнетиками, т. е. полностью выталкивают магнитное поле.

Если сверхпроводник поместить в достаточно сильное магнитное поле, сверхпроводимость нарушается. Чем ниже температура, окружающая сверхпроводник, тем большая напряженность магнитного поля нужна, чтобы разрушить сверхпроводимость. На рисунке 5 дана зависимость критической температуры олова от напряженности магнитного поля.

В последнее время сверхпроводимость начали применять в технике. После того как были найдены сверхпроводники с высокой температурой перехода в магнитном поле, стало возможно изготовлять *сверхпроводящие соленоиды*. Такой соленоид устроен, как и обычный, только обмотка его изготовлена из сверхпроводящей проволоки, например из сплава ниобий — цирконий. Вся обмотка помещается в сосуд с жидким гелием. В этих условиях электрическое сопротивление обмотки равно нулю, и, таким образом, поддерживается магнитное поле без затраты энергии, которая при других способах нужна, чтобы преодолеть электрическое сопротивление обмотки. Хотя получение жидкого гелия для такого соленоида и требует затраты энергии, эта затрата во много раз меньше, чем потребность в энергии обычного соленоида, создающего такое же магнитное поле. Теперь построены сверхпроводящие соленоиды, создающие поля свыше 8 МА/м ($8 \cdot 10^6$ А/м). Сверхпроводящие соленоиды и вообще электротехнические сверхпроводящие устройства (например, электродвигатели и генераторы) имеют огромное будущее. Так, используя сверхпроводимость в мощных электрических генераторах, можно будет снизить размеры машин в три-четыре раза и свести на нет потери энергии. Возможно, будут созданы и сверхпроводящие линии электропередач — без потерь энергии на нагревание проводов. Однако надо всегда помнить, что современные сверхпроводящие материалы требуют охлаждения жидким гелием до очень низких температур. Чтобы создать и поддерживать эти низкие температуры, необходимы специальные холодильные установки и затраты энергии. Поэтому одна из интереснейших и важных задач современной науки — поиск высокотемпературных сверхпроводников, материалов, у которых сверхпроводимость наступает при существенно более высоких температурах, хотя бы при температуре жидкого азота — ведь охлаждение жидким азотом гораздо дешевле и проще, чем жидким гелием.

Сверхтекучесть

Гелий обладает удивительным свойством: из всех существующих в мире веществ он сжижается при самой низкой температуре: 4,2 К (—269° С). Но у гелия есть и другие удивительные свойства. При дальнейшем охлаждении он остается жидким. Все остальные вещества при охлаждении в конце концов затвердевают.

В 1938 г. в Московском институте физических проблем академик П. Л. Капица обнаружил, что при температуре ниже 2,2 К жидкий гелий обладает новым свойством: он приобретает способность протекать без какого-либо трения. Это свойство было названо *сверхтекучестью*, а гелий при температуре ниже 2,2 К — гелием-II.

В опыте Капицы гелий-II протекал за несколько секунд между плотно сжатыми шлифованными стеклянными пластинами, между которыми ширина щели всего 0,5 мкм (рис. 6). При температуре выше 2,2 К жидкий гелий лишь с трудом просачивается через такую щель. Это показывает, что вязкость у сверхтекучего гелия в миллиарды раз меньше, чем у воды. По современным представлениям вязкость его равна нулю.

Сверхтекучий гелий образует так называемую «ползущую» пленку толщиной около 10 нм (10^{-8} м). Такой пленкой он может подниматься вверх по вертикальной стенке сосуда и вытекать из него (рис. 7). Любая жидкость, смачивающая твердую поверхность, образует пленку, но быстро перетекать по этой пленке не может никакая другая жидкость, кроме гелия-II. Это свойство обусловлено его сверхтекучестью.

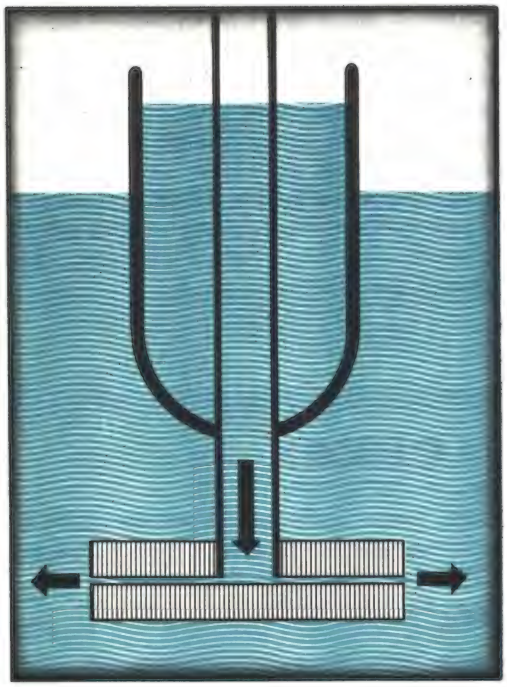
Удивительные свойства жидкого гелия теоретически объяснил советский ученый Л. Д. Ландау. Кратко это объяснение сводится к следующему: в гелии-II так мало квантов тепла, что на все его частицы их не хватает, и образуются как бы две жидкости, одновременно существующие: нормальный гелий, каждая частица которого несет на себе квант тепла, и сверхтекучий гелий, у частиц которого нет квантов тепла. Сверхтекучая часть гелия как бы находится при абсолютном нуле температуры; она не обладает вязкостью, и поэтому обе жидкости могут двигаться друг в друге без трения.

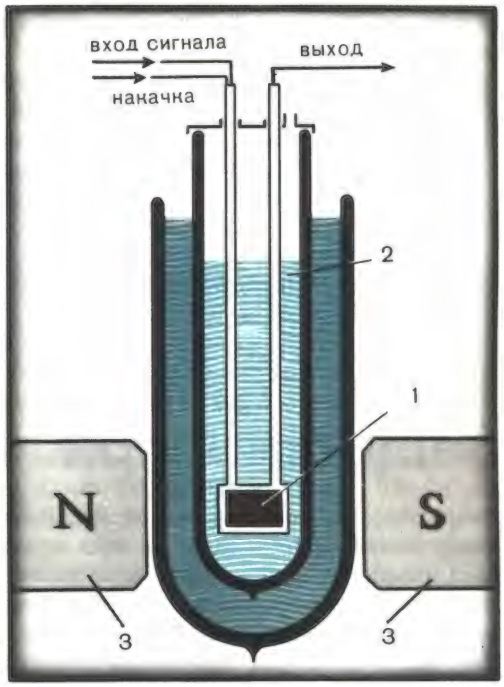
В опыте Капицы сверхтекучая часть гелия-II быстро перетекала через щель, а несверхтекучая часть через эту щель лишь медленно просачивалась. При этом сверхтекучая часть как бы отфильтровыва-

Рис. 6. Опыт Капицы для обнаружения сверхтекучести гелия. Сверхтекучий гелий быстро вытекает из внутренней трубки через узкую щель между двумя пластинками. Внешний сосуд, также заполненный гелием, обеспечивал одинаковую температуру гелия снаружи и внутри трубки.

Рис. 7. Жидкий сверхтекучий гелий образует на поверхности стекла пленку толщиной в несколько миллионных долей сантиметра. Эта пленка представляет собой подобие сифона, по которому жидкость вытекает из гелиевого резервуара.

Рис. 8. Парамагнитный кристалл — обычно рубин (*1*) — помещен внутри криостата и охлаждается жидким гелием (*2*). Взаимодействие постоянного магнитного поля (*3*) и электромагнитного поля накачки переводит частицы на более высокий энергетический уровень; под действием сигнала частицы совместно переходят на более низкий уровень и при этом излучают энергию.





лась. Опытом доказано, что за щелью у гелия-II более низкая температура, чем до щели. С понижением температуры ниже 2,2 К доля сверхтекучей части в гелии-II увеличивается: при абсолютном нуле весь гелий должен превратиться в сверхтекучий.

Квантовые генераторы и усилители

Крайне низкие гелиевые температуры используют для создания сверхчувствительных квантовых усилителей и генераторов радиоволн — мазеров. Если принимаемый сигнал очень слабый, его трудно различить на фоне собственных шумов радиоаппаратуры. Чтобы устранить шумы аппаратуры, основную часть мазера — резонатор с кристаллом — охлаждают жидким гелием. Тогда тепловые колебания атомов кристаллической решетки уменьшаются и приостанавливаются их самопроизвольные переходы с одного энергетического уровня на другой, а ведь именно эти колебания и переходы рождают шумы.

Схема квантового парамагнитного усилителя дана на рисунке 8. Создание квантовых парамагнитных усилителей намного повысило чувствительность аппаратуры, применяемой в радиоастрономии для приема радиоизлучения Солнца и звезд. Полупроводниковые лазеры (см. ст. «Полупроводники») также «чувствуют» себя значительно лучше в жидком азоте или гелии. При этом их мощность и к.п.д. значительно повышаются.

Наинизшая температура

Молекулы некоторых парамагнитных солей, например хромокалиевых квасцов, могут поворачиваться, как маленькие магнитики, вдоль силовых линий магнитного поля, а выделенное тепло отводится в окружающую среду. Если такую соль, предварительно

но охлажденную с помощью жидкого гелия до 1 К, поместить в сильное магнитное поле, то все ее молекулы повернутся вдоль силовых линий этого поля, а выделенное тепло передастся жидкому гелию. Если затем резко снять магнитное поле, то молекулы соли вновь повернутся в разные направления, а затраченная на это работа приведет к дальнейшему охлаждению соли.

Так может быть снижена температура до 0,001 К. Этот способ охлаждения называется *методом адиабатического размагничивания*. Таким же в принципе методом, только с применением других веществ, можно получить еще более низкую температуру.

Существенным недостатком получения очень низких температур методом размагничивания является его периодичность. Был предложен метод, лишенный этого недостатка. Впервые он был реализован у нас в стране. Метод основан на эффекте охлаждения, наступающего при растворении жидкого легкого изотопа ^{3}He в жидком сверхтекучем ^{4}He. При таком растворении атомы ^{3}He как бы расширяются в пустоту, поскольку не взаимодействуют со сверхтекучими атомами ^{4}He и при этом охлаждаются. Таким способом в непрерывном режиме можно достичь 0,001 К.

Наинизшая температура, полученная в лаборатории, равна 0,00001 К.

Охлаждение вещества до столь низких температур дает возможность физикам лучше понять строение материи, изучить проявляющиеся при этих температурах ее квантовые свойства.

Вещество при высоких давлениях

Является ли вещество газом, жидкостью или твердым телом, зависит от того, при каких температуре и давлении оно находится. С действием температуры человек познакомился давно, еще в то время, когда научился добывать огонь. Действие же давления было осмыслено значительно позднее. Для создания давления необходим высокий уровень техники.

Результаты, полученные при действии давления на вещество, были так интересны, что привлекли внимание многих ученых. Начала очень быстро развиваться новая увлекательная область науки — исследования при высоких давлениях.

В этой области знания уже достигнуты большие успехи. Получены интереснейшие данные об удивительных превращениях, которые происходят, когда вещество подвергают действию высоких давлений. Вот о некоторых превращениях и будет рассказано в этой статье.

Что такое давление

Почему кончик иголки должен быть острым? Почему человек проваливается в рыхлый снег, а на лыжах стоит на нем прочно?

Отношение веса человека к площади его подошв — это давление человека на поверхность. Давление показывает, какая сила действует на единицу площади. Предположим, что диаметр кончика иглы равен 10^{-5} м (0,01 мм) (а это еще тупая игла). Тогда площадь кончика равна $\frac{\pi d^2}{4}$, или $0{,}78 \cdot 10^{-10}$ м^2. Если наперсток нажимает на иглу с силой всего 0,01 Н, то давление под кончиком достигнет огромного размера:

$$0{,}01249 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 124{,}9 \text{ МПа} \left(\text{или } 1274 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right)$$

и игла легко проткнет материю. Жало комара еще тоньше, чем игла, и понятно, почему комар так легко прокалывает кожу.

Если масса взрослого человека 70 кг, то легко определить его вес — 685 Н. При площади его подошв 500 см^2 давление на пол будет $685 : 500 \simeq 1{,}4$ Н/см^2, или 14 кПа. Этого достаточно, чтобы продавить снег. Площадь лыж около 4000 см^2, т. е. в 8 раз больше площади подошв человека. Следовательно, давление лыжника на снег в 8 раз меньше. Провалиться труднее.

Атмосферное давление — это гидростатическое давление, оказываемое атмосферой на все находящиеся в ней предметы. Атмосферное давление убывает при подъеме в горы и растет при опускании в шахты. Его измеряют барометром. Значение высоты столба ртути в ртутном барометре пересчитывают для условий 0° С и нормального ускорения свободного падения. Условились считать нормальным атмосферным давлением давление столба ртути высотой

760 мм, равное 101,3 кПа. Площадь поверхности человеческого тела равна приблизительно 1200 см^2, следовательно, сила атмосферного давления, приходящаяся на всю площадь человеческого тела, составляет 120 000 Н (120 кН).

А если спуститься под воду? Там давление возрастает. Ведь плотность воды в тысячу раз больше плотности воздуха. На каждые 10 м глубины давление возрастает приблизительно на 100 кПа и на глубине 10 км достигает примерно 100 МПа ($\simeq$1000 кгс/см^2). В толще Земли давление возрастает еще сильнее. В центре Земли оно доходит до нескольких сотен гигапаскалей, или нескольких сотен тысяч мегапаскалей (миллионы кгс/см^2).

Каков предел давления?

А вообще каков предел давления? В пространстве, где нет ни одной частицы вещества, давление равно нулю. А верхний предел?

Представим себе ящик, стенки которого могут выдержать любое давление. Начнем нагнетать в него газ, например двуокись углерода — обычный углекислый газ, которым газируют воду. При накачивании углекислого газа число его молекул в ящике начнет расти. Плотность газа и давление тоже возрастут. Молекулам в ящике станет теснее. При некоторой плотности газ начнет сжижаться. Чем больше молекул в ящике, тем меньше расстояния и больше силы взаимодействия между ними. Благодаря этому вязкость углекислого газа возрастает, и при давлении в несколько сотен мегапаскалей он затвердеет. Продолжим сжатие. Предположим, что одна стенка ящика подвижная и, перемещая ее как поршень, мы сжимаем твердую двуокись углерода. При давлениях в тысячи мегапаскалей атомы подойдут так близко друг к другу, что электронам станет трудно двигаться вокруг ядер. Появятся искажения электронных оболочек.

Более половины химических элементов устроено так, что на их внутренних электронных орбитах есть свободные места. При дальнейшем сжатии (до десятков гигапаскалей) электроны в таких атомах сдвигаются на свободные места поближе к ядру. При этом изменяются химические свойства элементов.

При давлениях в сотни гигапаскалей может оказаться, что электронам выгоднее вращаться не вокруг отдельных ядер, а в виде «электронного газа» вокруг всех ядер: вещества переходят в металлическое состояние, даже если при нормальном давлении они были диэлектриками. Именно из такого вещества состоят белые карлики — звезды, внутри которых давление десятки тысяч терапаскалей (10^{16} Па), а плотность такова, что 1 см^3 вещества обладает массой в несколько тысяч килограммов.

Как создают давление

Вернемся в наши привычные земные условия. Здесь мы очень часто встречаемся со сравнительно высоким давлением и используем его. Под повышенным давлением находятся в баллонах углекислый газ, кислород, азот и другие газы. Давление газов в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания толкает поршни и двигает автомобили, самолеты, теплоходы. В стволе орудия давление пороховых газов доходит до нескольких сотен мегапаскалей и выталкивает снаряд. Давление в недрах Земли заставляет нефть и газ бить фонтаном из скважины и превращает при низких температурах газ с водой в твердый газовый гидрат. Давление пара достигает десятков мегапаскалей, оно движет поршни паровой машины и парового поршневого насоса, вращает лопатки рабочих колес турбины. Давление используют в гидромониторах — водяных пушках, которые струей воды режут и размывают грунт...

В лабораториях высокое давление создается в сложных аппаратах. Газы сжимают компрессорами. Это мощные и точные машины. Существуют мощные компрессоры, способные сжать газ до 2 ГПа. При обычных температуре и давлении в интервале 1—2 ГПа многие газы затвердевают. Такое же превращение, но при меньшем давлении происходит с жидкостями. А вот твердые тела можно сжимать сколько угодно, только бы выдержал сосуд, в котором это вещество находится.

Какое давление может выдержать аппарат!

Разумеется, для изготовления аппаратов высокого давления применяют прочные материалы — легированные стали и сплавы. Даже цилиндр из лучших сортов стали при любой толщине стенок не выдержит давления больше чем 4 ГПа — он разорвется.

Рис. 1. Аппарат с гидравлической поддержкой; между стенками сосудов нагнетается жидкость: чем ближе к центру, тем под бóльшим давлением.

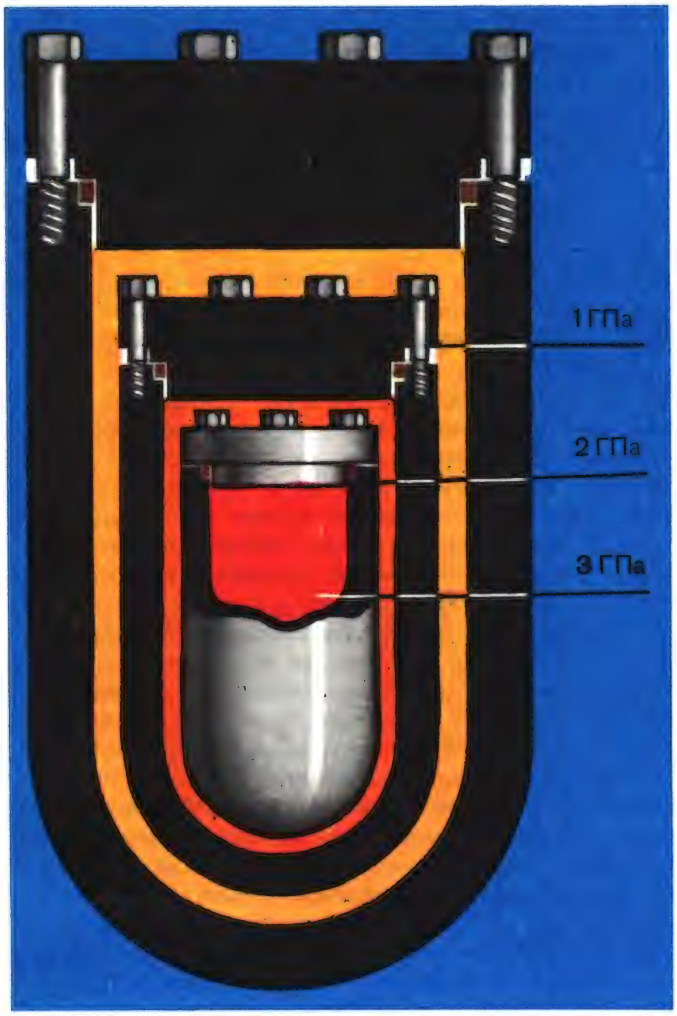
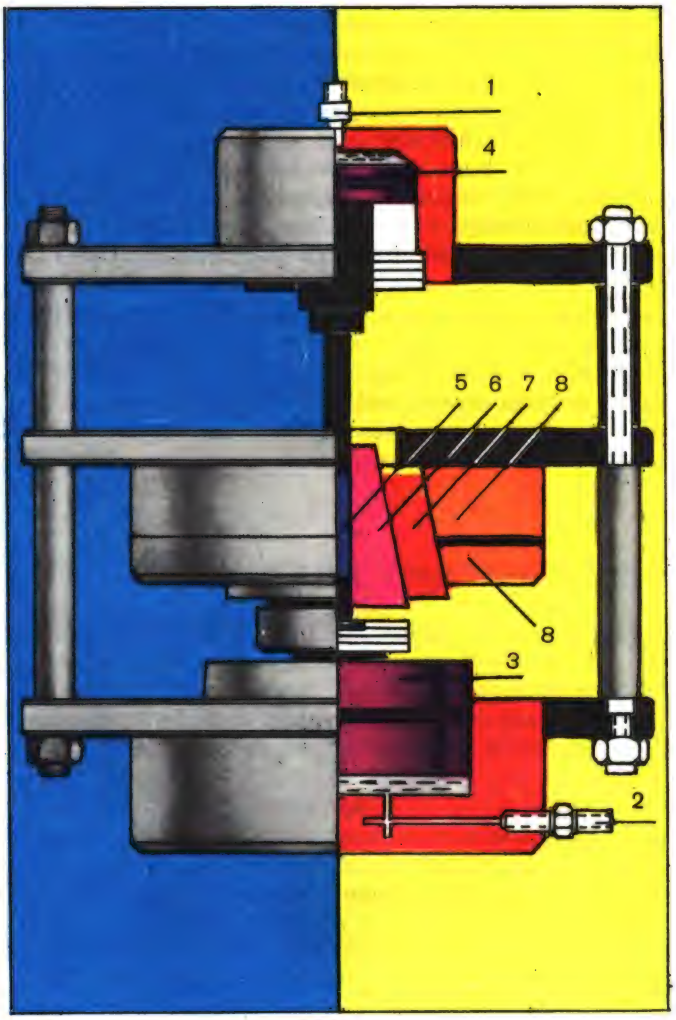


Рис. 2. Аппарат с коническими оправками (мультипликатор с двойной поддержкой): *1* и *2* — штуцеры, через которые к поршням подается под высоким давлением масло; *3* и *4* — поршни; *5* — исследуемое вещество; *6* — конический сосуд; *7* и *8* — оправки.



Как же построить аппараты, которые способны выдержать давление в десятки и сотни гигапаскалей?

Можно поступить так. Сосуд, в котором нужно создать высокое давление, вставить в такой же сосуд больших размеров, этот — в еще более крупный и так далее и устроить стальное подобие игрушки «матрешки». В пространствах между сосудами создают давления, отличающиеся друг от друга на 1—2 ГПа. При достаточном числе вставленных друг в друга сосудов давление во внутреннем сосуде теоретически может быть доведено до любой величины (рис. 1). Но изготовить такой аппарат неимоверно трудно.

Существуют и другие принципы. Сосуду, предназначенному для создания высокого давления, придают коническую форму и вставляют его в стальное кольцо с коническим отверстием. Если вдавливать этот сосуд в кольцо, которое называют оправкой, то он действует как клин — расширяет кольцо, но сам при этом сдавливается. Такой сжатый конусный сосуд может выдержать весьма большое давление. Этот прием следует повторить: сделать оправку тоже конической формы и вставить ее во вторую оправку. Тогда внутри конусного сосуда давление удается поднять еще выше. На рисунке 2 изображены конический сосуд с двумя ступенями поддержки — *оправками* (*7*, *8*) и два гидравлических пресса, передвигающих стальные поршни (*3*, *4*), между которыми находится исследуемое вещество (*5*). Поддерживающее давление можно регулировать, перемещая нижний поршень. В таком аппарате можно достичь давления от 5 до 10 ГПа (от 50 до 100 тыс. атм.).

Рис. 3. Схема сжатия куба.

Рис. 4. Схема сжатия тетраэдра.

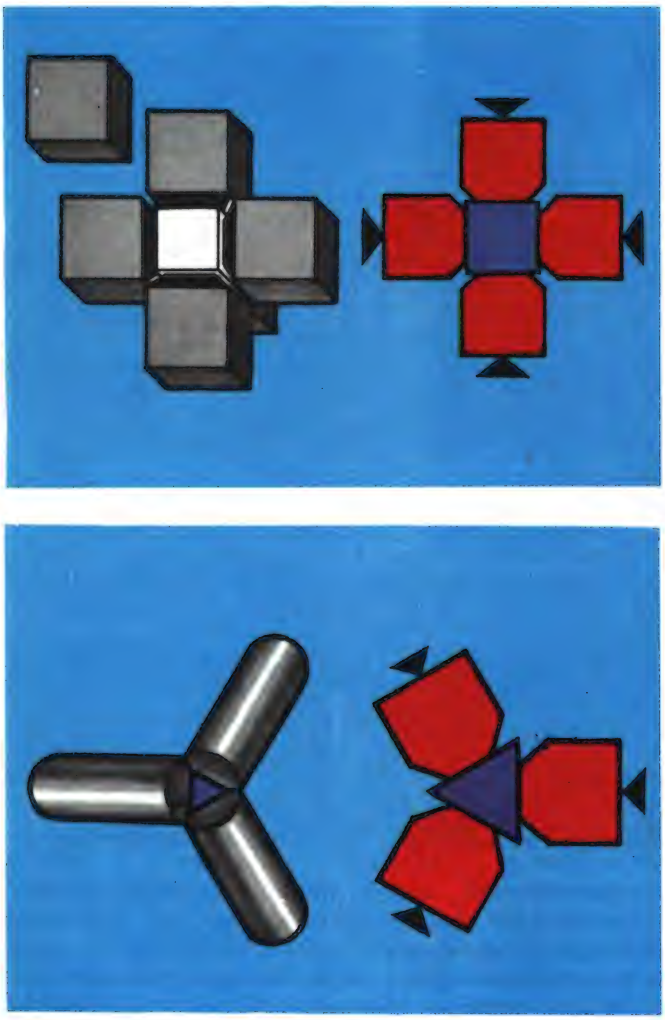
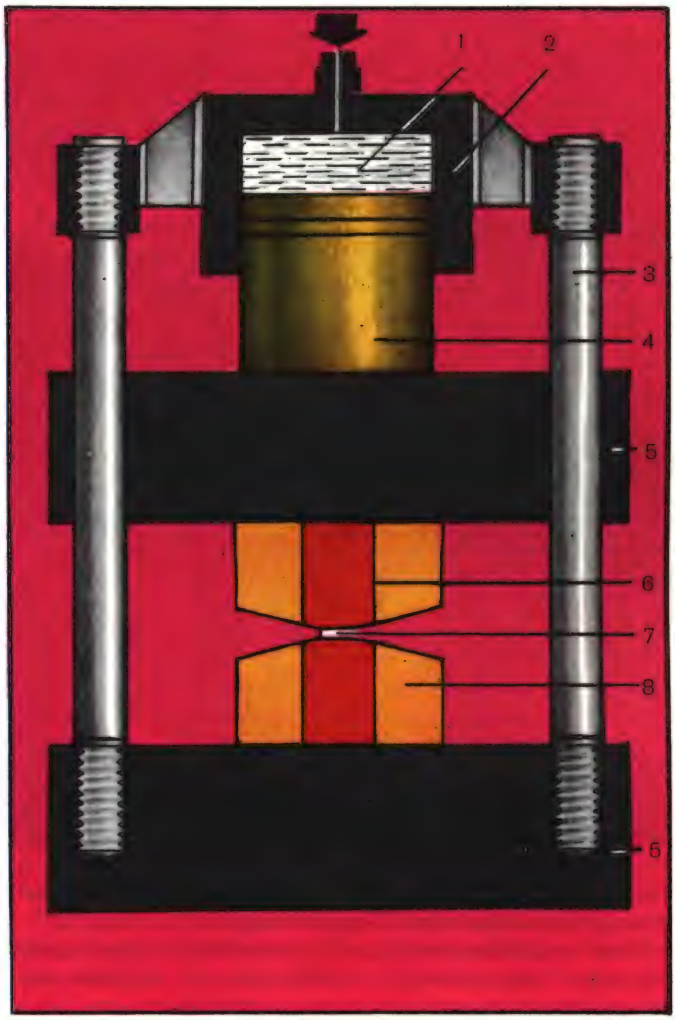


Рис. 5. Гидравлический пресс с «наковальнями»: *1* — масло; *2* — цилиндр гидравлического пресса; *3* — тяга; *4* — поршень; *5* — плиты; *6* — твердый сплав (карбид вольфрама); *7* — исследуемое вещество; *8* — сталь.



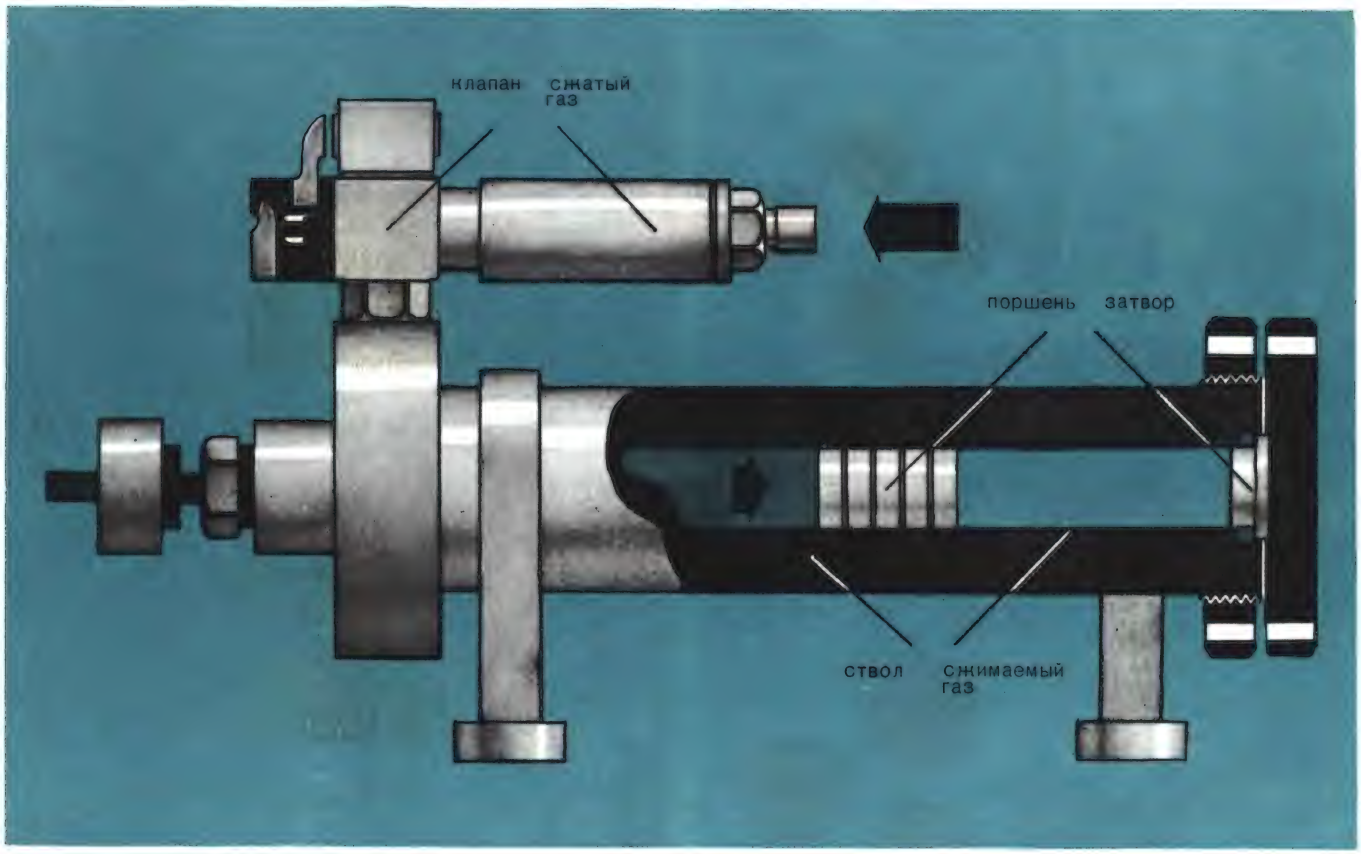
Любое твердое тело сопротивляется сжатию больше, чем растяжению. На этом свойстве материалов основана конструкция аппарата, в которой все части, находящиеся под очень большим давлением, только сжимаются. Одна из схем такого аппарата изображена на рисунке 3. Кубик вещества находится между шестью поршнями из твердейшего сплава — карбида вольфрама. Эти поршни одновременно передвигаются к центру системы мощными гидравлическими прессами. Веществу деваться некуда, оно может только медленно выдавливаться (течь) в щели между поршнями.

В результате внутри вещества развиваются огромные давления — до 20 ГПа. В другой схеме (рис. 4) веществу придают вид тетраэдра и сжимают его четырьмя поршнями с треугольными наконечниками.

Самые высокие статические, т. е. поддерживаемые длительное время, давления достигнуты в аппаратах, которые построены по принципу молота и наковальни. Из очень твердого сплава изготовляют две наковальни и помещают их между плитами мощного гидравлического пресса (рис. 5). Между наковальнями находится тонкий слой исследуемого вещества. При сжатии таких плит в веществе развивается огромное давление — более 50 ГПа. Большего давления не выдерживает материал, из которого сделаны наковальни.

Подсчитаем, с какой силой нужно сжать наковальни, чтобы достичь такого давления. Пусть диаметр основания наковальни, на котором расположено вещество, равен 1,6 см. Тогда площадь наковальни равна приблизительно 2 см^2. Значит, чтобы получить давление 50 ГПа ($50 \cdot 10^9$ Па), нужно сжать

Рис. 6. Адиабатическая пушка.



плиты с силой 10 000 кН. Это груз двадцати 50-тонных товарных вагонов. Целый поезд!

Если основание наковален изготовлять из искусственного алмаза (типа карбонадо), то в таком аппарате можно достичь давления 10^{12} Па.

Кроме статического давления существует еще динамическое, быстро меняющееся давление; оно возникает и исчезает в доли секунды. Таково давление взрыва. Динамические давления возникают в двигателях внутреннего сгорания, в стволах орудий при стрельбе и т. д.

Представим себе, что выходное отверстие в стволе артиллерийского орудия закрыто стальной пробкой. Если таким орудием произвести выстрел, то снаряд, который легко пробил бы броню танка, эту пробку не пробьет. Он долетит почти (*почти!*) до этой пробки, остановится и... полетит обратно. Не даст ему пробить пробку сжатый газ. В стволе орудия находится воздух. При выстреле снаряд в стволе, как поршень, гонит перед собой воздух. В конце ствола давление воздуха и его плотность настолько увеличатся, что воздух начнет действовать как мощная пружина и остановит снаряд. А дальше, как всякая пружина, воздух разжимается (расширяется) и двигает снаряд обратно. Так как сжатие в этом случае происходит в доли секунды, то газ очень быстро нагревается до очень высокой температуры.

На этом принципе созданы установки для так называемого *адиабатического*, т. е. без обмена тепла с окружающей средой, сжатия газа (рис. 6). В такой установке можно получить давление до 3 ГПа и одновременно температуру до 10 000 К. Это дает возможность ученым исследовать поведение сжатых и нагретых газов и их взаимодействие между собой.

Интересно напомнить, что в XVIII в. такой принцип был использован для постройки воздушного огнива. Это была трубка, закрытая с одного конца. В трубке двигался поршень. При быстром сдавливании поршня воздух в трубке нагревался и воспламенял трут.

Итак, в настоящее время в лабораториях достигают давлений до 250 ГПа. Для чего же это нужно? Давление сильно изменяет свойства вещества. В первую очередь меняется его плотность. И это изменение плотности приводит к удивительным явлениям.

Полиморфные переходы

Одно и то же вещество может существовать в различных, так называемых аллотропических формах: кислород и озон, графит и алмаз. У химических соединений такие аллотропические формы называются *полиморфными модификациями*. При изменении окружающих условий — температуры, давления, когда это изменение достигло определенной стадии, вещество из одной аллотропической формы переходит в другую и приобретает другие химические или физические свойства. Одно из объяснений причины появления различных полиморфных форм состоит в следующем: пространство ионных кристаллов, как правило, заполнено отрицательно заряженными анионами, в пустотах между которыми расположены положительно заряженные катионы. При сжатии кристалла фактически сжимаются анионы. По мере сжатия разница в размерах радиусов анионов и катионов уменьшается. Наконец, наступает момент, когда совершается фазовый переход — появляется новая полиморфная модификация.

В наше время считают, что при давлениях до 5 ГПа у каждого химического соединения возможен по крайней мере один полиморфный переход. Опыты показывают, что у многих веществ их гораздо больше. У камфары их одиннадцать, у воды — восемь, у висмута — восемь и т. д. Остановимся на воде. При 0° С вода замерзает. Если лед сжимать, то при 3 ГПа образуется форма льда-VII, который плавится при 190° С. Если бы лед-VII сохранял свои свойства и при снижении давления, на нем, как на плите, было бы можно сварить суп. Лед-VII обладает большой твердостью и может поэтому стать причиной катастрофы. В подшипниках, в которых вращаются валы мощных турбин, развивается огромное давление. Если в смазке есть хоть немного воды, она замерзает. Образовавшийся лед, как песок, трет вал и подшипник и быстро выводит их из строя.

В природе существуют и необратимые переходы: вещества, полученные под давлением, сохраняют свои свойства и после того, как давление снято. Например, углерод. Этот элемент может существовать в виде двух полиморфных модификаций — графита и алмаза. Как только это было установлено, начались попытки превратить графит в алмаз. На рисунках 8 и 9, стр. 242 и 243, изображены кристаллические решетки графита и алмаза. В графите атомы углерода расположены в углах шестиугольников и слои этих шестиугольников находятся на расстоянии 0,35 нм ($0{,}35 \cdot 10^{-9}$ м) друг от друга. Слои шестиугольников, как чешуйки, скользят друг по другу. Поэтому графит мягок, из него делают грифели, иногда употребляют для смазки.

В алмазе соседние атомы углерода находятся на расстоянии 0,154 нм друг от друга. Таким образом, в алмазе расстояние между атомами почти вдвое меньше, чем в графите. Алмаз — самое твердое вещество. А так как алмаз встречается в природе довольно редко, он считается драгоценным камнем и стоит очень дорого. Не удивительно, что уже давно люди стремились найти способ превращения графита в алмаз. На решение этой проблемы было потрачено немало сил и средств, и в 50-х годах нашего века успех был достигнут. Теперь промышленность производит технические алмазы.

Чтобы графит мог перестроиться в алмаз, нужно сжать его до давлений в десятки гигапаскалей и нагреть при этом до очень высокой температуры. Правда, графит можно превратить в алмаз и при комнатной температуре при давлении всего около 1 ГПа, но тогда нужно было бы ждать века, пока получится хоть крупинка алмаза. Высокая температура нужна, чтобы процесс превращения шел быстро. А чем выше температура, тем большее требуется давление.

Кроме высокой температуры для перехода графита в алмаз нужны катализаторы — вещества, ускоряющие процесс. Но в последние годы научились обходиться и без них.

Аппарат, в котором получают алмазы, изображен на рисунке 7. Он состоит из многослойного кольцевого сосуда. Внутренний слой сделан из сверхтвердого сплава карбида вольфрама. На этот слой надеты пояса (бандажи) из твердой стали, мягкой стали, меди и пояс, в котором циркулирует охлаждающая вода. Такое чередование материалов уменьшает опасность разлета осколков, если аппарат разрушится.

Сверху и снизу аппарат закрыт многослойными крышками. Внутренние части — это штампы из сверхтвердого сплава. На конусные части штампов надевают прокладки из пирофиллита (минерал — алюмосиликат железа). Он обладает свойством становиться пластичным при очень высоком давлении и высокой температуре.

Внутрь кольцевого сосуда вставляют контейнер из пирофиллита. В контейнере находятся графитовый стержень и катализатор. Все три части аппарата собирают и вставляют в гидравлический пресс. Затем сжимают плиты пресса и начинают увеличивать давление в аппарате. Пирофиллит заполняет

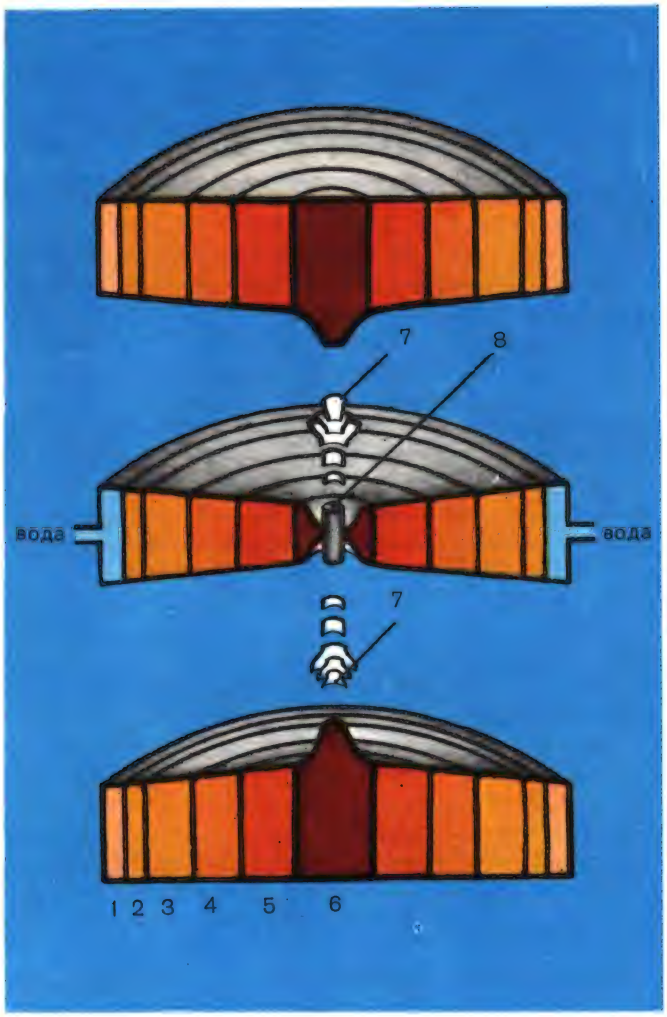


Рис. 7. Схема бандажного аппарата для получения алмазов: *1* — медь; *2* — мягкая сталь; *3* — сталь; *4* — твердая сталь; *5* — самая твердая сталь; *6* — карбид вольфрама; *7* — прокладки (сталь, пирофиллит, никель); *8* — графит.

все неплотности между штампами и кольцевым сосудом и предотвращает падение давления.

Чтобы нагреть содержимое контейнера, через штампы пропускают ток большой силы. Штампы изолированы от плит пресса и соединены металлическими прокладками с графитовым стержнем в контейнере. Ток, проходящий через эту электрическую цепь, нагревает графит до 3000° С.

Проходят минуты, и процесс закончен. Внутри контейнера уже не графит, а кристаллики алмаза с ребром до 2 мм.

Алмаз ценится не только как украшение. Из алмазов изготовляют резцы, сверла, фрезы, шлифовальные круги, буровые коронки. Алмазные инструменты обрабатывают самые твердые сплавы с очень большой скоростью, точностью и чистотой.

При давлении 10 ГПа и температуре 1200—1400° С в новую модификацию переходит и кварц — он становится вдвое плотнее обычного.

Любопытно, что частицы именно такого кварца найдены в крупнейшем метеоритном кратере в штате Аризона (США). Возможно, он образовался там от удара и разогрева почвы при падении метеорита.

Новый минерал назван *стиповеритом*, по имени синтезировавших его советских ученых Стишова, Поповой и Верещагина.

Найден еще один полиморфный переход. Нитрид бора (BN) — белый порошок, решетка которого очень сходна строением с решеткой графита,— может под давлением 7 ГПа и при температуре около 1500° С необратимо перестроиться в *боразон*. Твердость боразона сравнима с твердостью алмаза, а термическая стойкость его еще выше.

Давление и химические реакции

Известно, что для производства пороха нужна селитра: калиевая, натриевая или аммонийная — соли азотной кислоты. До первой мировой войны основным поставщиком натриевой селитры была страна Чили. Вскоре после начала войны Германия оказалась в катастрофическом положении: морская блокада сделала доставку селитры из Чили невозможной. И тогда немецкие химики разработали метод, позволявший синтезировать аммиак из азота и водорода. Из аммиака получали азотную кислоту и аммиачную селитру.

Синтез аммиака вели под давлением в несколько десятков мегапаскалей. Давление оказалось необходимым, потому что оно значительно ускоряет химические реакции. Прежде всего оно увеличивает концентрацию компонентов, т. е. их содержание в единице объема. Кроме того, реакция синтеза аммиака

$$3H_2 + N_2 \rightleftarrows 2NH_3$$

идет с уменьшением объема: из трех объемов водорода и одного объема азота получаются два объема аммиака. При увеличении давления система (азот + + водород + аммиак) словно сопротивляется этому и, чтобы снизить давление, дает аммиак.

Сейчас во всем мире заводы синтетического аммиака вырабатывают десятки миллионов тонн аммиачной селитры — одного из самых распространенных минеральных удобрений.

В наше время много химических продуктов получают в промышленности с помощью высокого давления, например метиловый спирт, уксусную кислоту. На производство этилового спирта еще недавно расходовали сотни тысяч тонн зерна и картофеля. Теперь спирт получают под давлением из воды и этилена — газа, выделяющегося в большом

количестве при добыче и переработке нефти. Тот же этилен при давлении 150—300 МПа полимеризуется в полиэтилен — материал, обладающий рядом ценных качеств (см. ст. «Полимеры»). Под давлением формуют синтетические волокна. Можно насчитать сотни технологических процессов, которые стали возможными благодаря высоким давлениям.

Что нужно знать, чтобы построить химический завод?

Прежде всего для этого надо знать, как ведут себя под давлением различные жидкости, газы и твердые тела, когда они находятся в одном аппарате. Раньше чем эти вещества прореагируют друг с другом, они будут соприкасаться и смешиваться, газы будут растворяться в жидкостях, а жидкости и даже твердые тела — в сжатых газах.

Долгое время не могли понять, почему на лопатках паровых турбин оседают соли. В воде, которую подводят в паровые котлы, содержатся соли, но ведь в турбину попадает не вода, а пар, в котором солей, как считалось, нет. Следовательно, на лопатки турбины попадают каким-то образом водяные брызги. Чтобы избежать этого, устанавливали отбойники, брызгоуловители, отсекатели, но ничего не помогало. Разгадка пришла, когда было выяснено, что под высоким давлением водяной пар прекрасно растворяет твердые соли и уносит их в турбину. Стало ясно, что котлы надо питать водой, в которой нет солей.

А свойство сжатого пара растворять соль научились использовать для получения ценных веществ. Например, в водяном паре при высоких давлениях и температуре растворяют кремнезем (SiO_2), а затем, снизив температуру, кристаллизуют из газового раствора кварц. Так выращивают кристаллы чистейшего кварца (горного хрусталя) массой в несколько килограммов, из которых изготовляют пьезокварцевые пластинки.

Так же синтезируют и другие ценные минералы. Этот метод называют *гидротермальным синтезом*, потому что процесс идет в водяном паре при высокой температуре. Кстати, такие же условия — высокая температура и большое давление — существуют в глубине Земли. Там тоже вырастают кристаллы минералов, только значительно медленнее, чем в наших лабораториях и заводских установках.

В сжатом газе, так же как и в паре, растворяются жидкости и твердые тела. Газ, прошедший через компрессор, несет в себе масло, которым смазаны поршни компрессора. При этом разные газы по-разному загрязняются такой нежелательной примесью. Удалить масло можно, только охладив газ или снизив давление.

Не следует забывать, что речь идет о больших количествах жидкости, попадающей в газ. Опыты показали, что, например, 1 м^3 этилена при 200 МПа и 25° С растворяет до 3 кг масла. При 45° С и 30 МПа такое же количество этилена растворяет до 0,5 кг нафталина, 1 м^3 углекислого газа — до 200 г нафталина.

Это свойство сжатых газов можно использовать для разгонки жидких смесей. Разные жидкости поразному растворяются в газах. При определенных давлении и температуре газ растворит некоторую часть смеси. А затем, снижая давление, можно выделить из газа растворенную жидкость. При этом происходит изотермическая перегонка, т. е. перегонка при постоянной температуре и переменном давлении.

Но не следует удивляться, что жидкости и твердые тела хорошо растворяются в сжатых газах. Ведь плотность сильно сжатого газа близка к плотности жидкости. Например, плотность азота при давлении 1 ГПа и 25° С равна 1250 кг/м^3, т. е. такой азот может тонуть в воде. Эта особенность сжатого газа приводит к интересному явлению, открытому сравнительно недавно. Оказывается, два газа, сжатые до высокого давления, не смешиваются, а расслаиваются на два слоя, как масло и вода. Граница раздела газовых слоев сфотографирована через прочные стекла; даже измерено поверхностное натяжение на этой границе.

Давление и живые организмы

Увеличение давления выше атмосферного сильно действует на организм человека. А вот глубоководные рыбы живут под давлением в десятки мегапаскалей и, наоборот, гибнут на поверхности воды. Некоторые виды бактерий преспокойно выдерживают давления до сотни мегапаскалей, но гибнут при давлении 700 МПа: вода в их клетках превращается в одну из полиморфных модификаций льда и разрывает их. Это явление навело на мысль о возможности консервировать продукты, подвергая их высокому давлению. Опыты показали, что, действительно,

молоко, подвергнутое высокому давлению, долго не скисает, так как в нем уже нет живых бактерий молочнокислого брожения. Давление убивает ряд болезнетворных бактерий и вирусов. Оно действует также на ферменты.

Пластичный мрамор

Давление изменяет свойства конструкционных материалов. Хрупкий мрамор становится пластичным: его можно растягивать, как медь, и сжимать. Сталь, подвергнутая давлению 2,5 ГПа, становится прочнее и более вязкой. Ее и другие металлы под таким давлением можно продавливать через фасонные отверстия и получать детали, которые не требуют дальнейшей доводки.

Прочность различных веществ, с которой мы имеем дело в жизни, значительно меньше той, которая должна быть, если ее рассчитать исходя из значения межатомных сил, действующих в кристаллической решетке. Такое несоответствие объясняют тем, что в решетке обычно нарушен порядок. Представьте себе кирпичную кладку с шахматным порядком расположения кирпичей. Если некоторые кирпичи пропущены или спутаны ряды, то кладка развалится.

Предполагают, что если металл кристаллизовать из расплава под высоким давлением, то можно получить правильную кристаллическую решетку, без дефектов, и тогда прочность металла будет значительно выше. Более прочный металл даст возможность построить аппараты, которые выдержат еще большее давление.

Взрывы и землетрясения в лабораториях

Взрыв — это мгновенное повышение давления и температуры вследствие быстрого протекания химической или ядерной реакции. При взрыве мгновенно выделяется большое количество энергии и образуются газы, что и приводит к повышению давления и температуры. Мы привыкли к тому, что взрыв разрушает. Теперь мы знаем, что взрыв может приносить и пользу. Он работает и в двигателях внутреннего сгорания, применяется для штамповки сложных по форме деталей.

Взрыв служит и для научных исследований при очень высоких (до сотен гигапаскалей) давлениях. Оказалось, что если смеси веществ в ампулах обжимают взрывом, то между этими веществами наблюдаются быстрые реакции, которые в обычных условиях вообще не происходят или же идут очень медленно. Предполагают, что в таких случаях при взрывном обжатии ударной волной реагирующие вещества переходят в квазижидкое (пластическое, текучее) состояние. При этом вся смесь отлично перемешивается и быстро реагирует. Таким способом получены феррит цинка, карбид титана и многие другие соединения.

Теперь с помощью взрыва достигают давлений 1000 ГПа (10^{12} Па). Повышение давления длится миллионные доли секунды, но и за это время в веществах происходят существенные изменения.

Так, например, при сжатии окиси неодима из мелкодисперсного порошка за микросекунды успевают вырасти монокристаллы. Скорость роста доходит до сотен метров в секунду.

Прохождение ударных волн через вещество может вызвать глубокие изменения структуры. Удалось, например, на основе двуокиси титана приготовить катализаторы, обжатие которых повышает их активность в сотни раз.

Поскольку при динамическом сжатии давление и температура изменяются в миллионы раз быстрее, чем при статическом сжатии, можно значительно скорее «заморозить» полученные вещества, т. е. сохранить при обычных условиях новые модификации, образовавшиеся при взрыве. Известно, что двуокись углерода отличается от двуокиси кремния тем, что у углерода в пространстве два ближайших соседа кислорода (координационное число 2), а у кремния четыре. Поэтому двуокись кремния — прочный и тугоплавкий кристалл, а CO_2 — газ. Если бы удалось давлением повысить координационное число углерода до четырех, CO_2 стал бы легким изоляционным материалом.

Подобным же образом можно было бы превратить кислород в твердое тело или труднолетучую жидкость. Первые удачные опыты по полимеризации кислорода уже проведены.

При сжатии вещество сильно изменяется, потому что к нему подводят энергию. Подсчитано, что сжатие 1 $см^3$ вещества до 100 МПа (10^8 Па) эквивалентно нагреву на 13° С. В веществе концентрируется энергия без повышения температуры.

Сейчас ударные волны в твердых телах создают, «выстреливая» в образец твердый ударник. В месте соприкосновения возникает ударная волна, движение которой в образце и вызывает сильнейшее сжа-

тие и нагрев образца. Для достижения высоких давлений ударник должен лететь со скоростью порядка 10—15 км/с. При этом удается достичь мгновенных давлений порядка 300 ГПа. Подвергнутые таким давлениям вещества уплотняются: свинец, например, в 3,3 раза, железо в 2,5 раза.

Но если при повышении температуры тела расширяются, плавятся и испаряются, то при повышении давления, наоборот, пары конденсируются, жидкости затвердевают. В этом случае давление действует противоположно температуре.

Более того, при сжатии вещества до очень высоких давлений настолько увеличивается вязкость среды, что этим сводится на нет высокий энергетический уровень сжатого вещества, тормозятся процессы, которые могли бы протекать в таком сильно сжатом веществе (вспомним процесс синтеза алмаза, который не идет при низкой температуре).

Чтобы «растормозить» процессы, не нагревая вещество, сжатое до высоких давлений, к нему прилагают силу сдвига. Для этого обойму, в которой находится сжатое вещество, поворачивают между наковальнями.

При этом в веществе происходят процессы, сходные с теми, которые идут в земной коре при землетрясениях. При сильном трении, вызванном поворотом, сдвигаются слои сильно сжатого вещества. Есть соединения, которые разрушаются, некоторые со взрывом. Протекают реакции, в обычных условиях не идущие. Многие соединения меняют свой цвет, например бесцветный фенолфталеин становится красным.

Исследование этих явлений позволяет получить новые данные о строении вещества.

Наука о высоких и сверхвысоких давлениях

Исследование веществ при высоких и сверхвысоких давлениях — увлекательная область науки. Давление вызывает в веществах удивительные изменения. Многие вещества в нормальных условиях — изоляторы, но при высоком давлении они превращаются в полупроводники, а полупроводники могут приобрести свойства металлов. Металлическую проводимость приобретают сера при ударном давлении около 23 ГПа, иод — при 13 ГПа. Теоретические расчеты показывают, что под давлением 200 ГПа твердый водород перейдет в металлическое состояние.

Исследования при высоких давлениях ценны не только для науки, но имеют большое практическое значение. Синтетические алмаз и боразон — превосходные материалы для режущих и шлифовальных инструментов. Искусственный кварц применяется в радиотехнике.

Волны и кванты

Что такое волна, знает всякий... или думает, что знает. А вот с понятием «квант», прочно закрепившимся не только в словаре физиков, но и в технике, инженерном деле, по-настоящему знакомы немногие.

Физики впервые ввели понятие «квант», исследуя излучение нагретых тел. И с этого началась цепь великих открытий. Удалось объяснить, по каким законам излучают Солнце и нагретая печь, как свет выбивает электроны из металла, почему устойчивы атомы и как они устроены. Были открыты принципы, на основе которых в наши дни работают лазеры и мазеры, созданы электронный микроскоп и транзистор и сделано еще многое другое. Итог этого пути — современная физика микромира — квантовая механика. Мы расскажем о главных открытиях, направивших ученых по трудной, но плодотворной «квантовой» дороге. Но вначале — о волнах.

Волны

Работами голландца Х. Гюйгенса и француза О. Френеля была установлена волновая природа светового излучения. Волна, складываясь с другой волной, колеблющейся с той же частотой, либо усиливается, либо ослабляется. При определенных условиях две волны могут вовсе погасить друг друга. Эта способность волн усиливаться или гаситься при их сложении называется *интерференцией*. Интерференция — один из основных признаков волнового процесса. Другой признак — *дифракция* — способность волн огибать предметы. Именно эти свойства заставили Гюйгенса и Френеля обратить внимание

Рис. 1. График волны с частотой колебаний ν, распространяющейся по оси x со скоростью

$$v=\frac{\lambda\omega}{2\pi};$$

$\omega=2\pi\nu$ — круговая частота. За время $t_2-t_1=\pi/2\omega$ волна прошла расстояние, равное четверти ее длины $\lambda/4$. В плоскость W, перпендикулярную оси x и пересекающую ее в точке a, «возмущение» из параллельной плоскости, проходящей через точку b, переносится волной за время $\pi/2\omega$, если $ba=\lambda/4$.

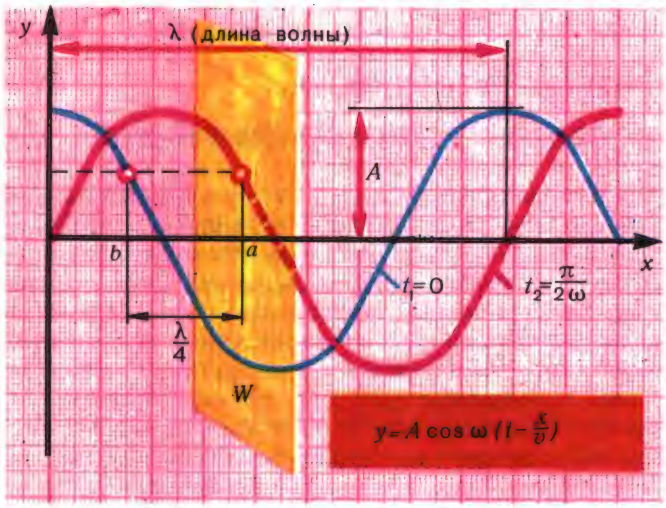


Рис. 2. Модель абсолютно черного тела. Так называют небольшое круглое отверстие d полого шара (или цилиндра) с зачерненными стенками. Попадающий в отверстие луч *1* обратно не возвращается. После нескольких отражений от зачерненных стенок в точках *2, 3, 4, 5, 6* и т. д. луч поглощается. Поэтому из отверстия d выходит излучение, характер которого определяется только температурой стенок полого шара (или цилиндра). Интересно заметить, что Солнце испускает свет по закону, близкому к закону излучения абсолютно черного тела.

на волновой характер света (рис. 1). В дальнейшем, обнаружив интерференцию и дифракцию электромагнитных волн, физики пришли к заключению, что не только солнечный свет, но и радиоволны, и рентгеновские лучи, и излучения атомных ядер, и не видимое глазом инфракрасное излучение нагретых тел — различные проявления одного и того же волнового процесса.

Во второй половине XIX в. английский ученый Д. Максвелл создал свою замечательную теорию электромагнитного поля. Из нее следовало, что должны существовать волны, в которых колеблются электрическое и магнитное поля, а скорость распространения таких волн в свободном пространстве — вакууме — равна примерно 300 000 км/с, т. е. совпадает по размеру со скоростью света. Такие волны названы *электромагнитными*. Совпадение их скорости со скоростью света было первым указанием на электромагнитную природу светового излучения.

В 1887 г. немецкий ученый Г. Герц показал, что радиоволны, а их электромагнитный характер не вызывал сомнений, отражаются и преломляются по таким же законам, как световые. Все это подтверждало электромагнитное происхождение светового излучения.

Однако физики столкнулись с большими трудностями, когда пытались объяснить законы излучения самого распространенного источника света — нагретого твердого тела. Ведь это и нить электрической лампы накаливания, и раскаленные топки печей, и... тело человека. Да и главный источник энергии — Солнце — излучает по законам, близким к законам излучения нагретого твердого тела. Конечно, мимо такой задачи пройти было невозможно.

Абсолютно черное тело

Но вот в начале XX в. английский ученый Д. Джинс рассчитал состав излучения в полости замкнутого сосуда со стенками, нагретыми до определенной температуры. Свои расчеты Джинс основывал на теории Максвелла, считая, что нагретая полость непрерывно испускает волны. Оказалось, что частоты излучения полости определяются только температурой стенок и не зависят от того, из какого материала они сделаны. Если в полости просверлить маленькое по сравнению с ее размерами отверстие, то из него должно выходить излучение, ничем не отличающееся от содержащегося внутри замкнутого сосуда. Такое отверстие излучает так же, как излучало бы абсолютно черное тело (рис. 2).

Понятие «абсолютно черное тело» условное. Когда физик что-то называет абсолютно черным, это не нужно понимать буквально. Просто названный так объект полностью поглощает все падающие на него лучи любой длины волны. Отверстие практически полностью поглощает падающий на него свет, но это совсем не означает, что оно не испускает никаких лучей. Происходит как раз обратное: поток излучения единицы площади поверхности абсолютно чер-

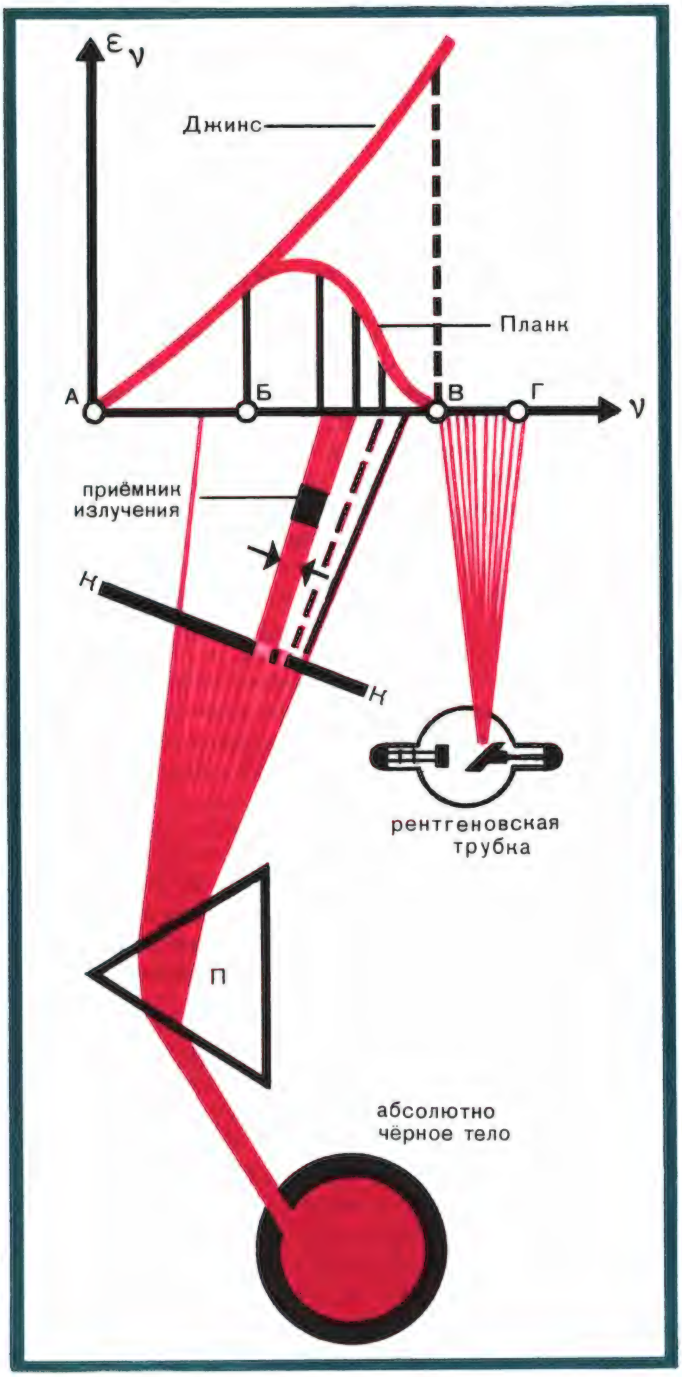


Рис. 3. По теории Джинса излучательная способность абсолютно черного тела ε_υ должна все время возрастать с увеличением частоты световых колебаний ν. Тогда любое нагретое тело должно было бы излучать в диапазоне частот *ВГ* рентгеновские лучи. По теории Планка излучательная способность возрастает лишь до определенной частоты, а затем убывает. Получается зависимость с максимумом. Опыт подтверждает теорию Планка. Если на пути излучения абсолютно черного тела поставить призму П, то световые волны с малыми частотами колебаний будут меньше отклоняться призмой, чем световые колебания с большей частотой. Измерив энергию лучей, соответствующих волнам с разной частотой колебаний, приемником лучистой энергии, который передвигается параллельно плоскости *КК*, можно получить зависимость, отображаемую законом излучения Планка.

ного тела больше потока излучения единицы площади поверхности любого другого тела, нагретого до такой же температуры. Причем этот поток излучения очень быстро увеличивается с ростом температуры: он пропорционален ее четвертой степени. Это закон Стефана — Больцмана. Для абсолютно черного тела его записывают в виде $\varphi = \sigma H T^4$. Здесь φ — поток излучения (Вт), испускаемый поверхностью тела, H — площадь поверхности (м^2), σ — постоянная Стефана — Больцмана, равная

$$5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}^{-4}.$$

Оценим по этой формуле поверхностную плотность потока электромагнитного излучения поверхности Солнца. Получим около 75 МВт/м^2. Это значение совпадает с измеренным, потому что, как уже отмечалось, Солнце излучает по закону, близкому к закону излучения абсолютно черного тела, нагретого до 5800 К (температура поверхности Солнца), хотя вряд ли наше дневное светило похоже на что-то черное.

Ультрафиолетовая катастрофа

Не только поверхностной плотностью потока излучения характеризуется излучение нагретых тел. С повышением температуры меняется цвет тела: от темно-красного у нагретой печи до ослепительно белого цвета Солнца,— все большая доля энергии приходится на область высоких частот. Меняется спектральный состав излучения. Зависимость излучаемой энергии от частоты физики определяют, измеряя энергию, заключенную в узких интервалах частот, например на участке от ν_1 до ν_2.

Если энергию, приходящуюся на этот участок, разделить на его ширину $\nu_2 - \nu_1$, то получается величина ε_ν — излучательная способность абсолютно черного тела для частоты ν, лежащей между ν_1 и ν_2.

Отложим теперь по оси ординат измеренные на опыте значения ε_ν, а по оси абсцисс соответствующие им частоты. Получится кривая с максимумом.

А вот теоретическая формула Релея — Джинса — парабола: $\varepsilon_\nu = \dfrac{2\pi\nu^2 kT}{c^2}$. Эта кривая не имеет максимума (рис. 3). Закономерность, полученная независимо Релеем и Джинсом, совпадает с опытными данными только для малых частот (в диапазоне ча-

стот *АБ*). В остальном эта формула нелепа. Из нее следует, что при любой температуре тела основная доля излучаемой им энергии приходится на область коротких волн.

Самое коротковолновое излучение, которое еще чувствует наш глаз,— фиолетовое. Поэтому из теории Джинса следовало: едва теплая печь должна казаться фиолетовой! Но Джинс провел все расчеты без ошибок, на основе проверенной, надежной теории Максвелла. В чем же дело? Подобрать формулу, которая правильно описывала излучение нагретого тела, удалось немецкому физику Максу Планку. Это было нелегким делом. Планк затратил два года, чтобы получить формулу, совпадающую с опытными данными. Вот знаменитая формула, носящая его имя:

$$\varepsilon_\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)}.$$

Здесь h — постоянная Планка, равная $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, c — скорость света, k — постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж · град$^{-1}$. Умноженная на температуру T, эта постоянная дает среднюю энергию колебаний атомов.

Появление слова «квант»

После длительных исследований Планк понял, что исходя из представлений о свете как о непрерывном волновом процессе теоретически вывести открытую им формулу невозможно. Формула получалась только в предположении, что свет излучается порциями — квантами, причем энергия кванта должна равняться $h\nu$. Это противоречило всем сложившимся представлениям о волновой природе электромагнитного излучения!

Однако другого выхода не было, и в 1900 г. Планк опубликовал полученные им результаты, сам еще до конца не веря в реальное существование квантов и рассматривая их как вспомогательное понятие, с помощью которого можно получить верную зависимость ε_ν от частоты излучения и температуры твердого тела.

Позднее А. Эйнштейн говорил: «...Планк посадил в ухо физикам блоху». Эта «блоха» — мысль о квантовом характере электромагнитного излучения — в конечном итоге и привела к созданию современной квантовой теории.

Кванты и электроны

Планк предполагал, что прерывно — квантами — свет только излучается, а распространяется как волна. На вопрос о способе поглощения света теория Планка не давала ответа. Носит ли поглощение непрерывный или квантовый характер?

Еще в 1887 г. физики открыли явление, которое впоследствии назвали *фотоэффектом*: под действием света из металлической пластины, помещенной в вакуум, вылетают отрицательно заряженные частицы — электроны. Тщательные измерения показали: скорости электронов тем больше, чем больше частота освещающего пластину света, и совсем не зависят от интенсивности падающего излучения. А ведь если бы поглощалась непрерывная волна, то скорости электронов должны были бы возрастать именно с увеличением интенсивности. Оказывается, эта загадка легко разгадывается, если предположить, что свет падает на пластинку квантами. Энергия кванта $h\nu$ растет с частотой и расходуется, во-первых, на работу A, которую нужно затратить, чтобы вырвать электрон из металла, и, во-вторых, на то, чтобы сообщить ему скорость, увеличить его кинетическую энергию. На основании закона сохранения энергии можно теперь записать: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$. В этой формуле m — масса, а v — скорость электрона. Это соотношение полностью объясняет все закономерности фотоэффекта. Впервые его записал в 1905 г. А. Эйнштейн. Из такого объяснения фотоэффекта вытекала и прерывность поглощения света.

Атом Бора

Следующий шаг в развитии учения о квантах сделал датский физик Нильс Бор. Он задался целью объяснить излучение отдельного атома. В твердом теле атомы в сильной степени взаимодействуют между собой и поэтому испускают непрерывный спектр излучения, который не зависит от того, из какого сорта атомов состоит твердое тело: спектры нагретых кусков меди или железа не отличаются, если температура одна и та же. Среди шума большой толпы невозможно разобрать отдельные голоса. Так и в твердом теле атомы теряют свою индиви-

дуальность. В газах же атомы расположены далеко друг от друга и не взаимодействуют между собой в процессе излучения, если, конечно, давление газа не слишком велико. Поэтому, когда излучает газ, «слышны голоса» отдельных атомов.

Если перед щелью спектрографа поставить колбу с водородом, светящимся под действием электрического разряда, то можно обнаружить излучение с набором волн 0,656 мкм, 0,486 мкм, 0,434 мкм и 0,410 мкм. Их принято обозначать H_α, H_β, H_γ, H_δ... Швейцарскому учителю И. Бальмеру удалось найти связь между этими длинами волн. Он подобрал формулу, по которой можно было бы рассчитать длины волн излучения водорода. Это было в 1885 г., а пятью годами позднее И. Ридберг придал его формуле современный вид: $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$. Постоянная величина $R = 10\,967\,758{,}1$ м$^{-1}$ впоследствии была названа *постоянной Ридберга*. Чтобы получить длину волны какой-либо линии спектра водорода, в формулу Бальмера нужно подставить вместо n одно из целых чисел: 3, 4, 5 или 6. В то время ни Бальмер, ни Ридберг и никто другой из физиков не могли объяснить, почему именно такой зависимостью связано «водородное» излучение. Бальмер верил, что в природе всюду должен царить порядок, и ему удалось просто подобрать, или, как мы говорим, получить, эмпирическую формулу. Формула оказалась точной. Разница между измеренными и вычисленными длинами волн объясняется лишь ошибками измерений.

Формула Бальмера ждала своего объяснения 28 лет. В 1911 г. великий английский физик Э. Резерфорд опытным путем показал, что в атоме существует положительно заряженное ядро, размеры которого малы по сравнению с размерами атома. Им же была предложена планетарная модель атома. Эта модель напоминала Солнечную систему: вокруг ядра — Солнца вращаются планеты — электроны (рис. 4). Эта аналогия еще глубже. Между ядром и электронами действуют силы притяжения, обратно пропорциональные квадрату расстояния между ними. Зависимость этих сил от расстояния такая же, как и в ньютоновском законе всемирного тяготения, управляющем движением планет.

Такие представления о строении атома хорошо согласовывались с опытными данными Резерфорда, но противоречили теории Максвелла. Из формул, выведенных Максвеллом, следовало, что «планетарный» атом не может быть устойчивым. Вращающийся вокруг ядра электрон должен все время терять энергию и в конечном итоге упасть на ядро. Но ведь атомы устойчивы! Значит, электроны в атоме не подчиняются законам Максвелла. К такому выводу пришел Нильс Бор. В 1913 г. ему удалось найти ключ к решению проблемы устойчивости атома. Это решение опиралось на законы, определяющие оптические спектры элементов, и прежде всего спектр атома водорода.

Атом водорода — простейший. Его ядро — положительно заряженная элементарная частица — протон, вокруг которого движется отрицательно заряженный электрон. Чем ближе орбита электрона к атомному ядру, тем меньше запас энергии атома, потому что с уменьшением расстояния между двумя электрическими зарядами разных знаков их общая энергия убывает. Бор предположил, что в атоме электроны могут двигаться только по определенным орбитам, которые называют *разрешенными*. С орбиты на орбиту электрон переходит только скачком. Если электрон переходит с какой-то разрешенной орбиты на более близкую к ядру, то атом испускает энергию в виде кванта электромагнитного излучения (рис. 4). Если же электрон переходит на дальнюю орбиту, то для этого атом должен поглотить квант энергии, равный разности между энергией атома, когда его электрон находится на дальней орбите, и энергией атома до поглощения кванта. Иными словами, каждой из орбит электрона соответствует определенная энергия атома. Обозначим эту энергию буквой E_n, значок внизу означает номер орбиты и может принимать разные значения. Величины E_n называют *уровнями энергии атома*. Бор предположил, что момент количества движения электрона по орбите носит квантовый характер и равен целому кратному n от величины $\frac{h}{2\pi}$, т. е. $mvr = n\frac{h}{2\pi}$. Из этого условия и условия равновесия электрона на орбите: $\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2}$ — и получается формула Ридберга. Условие равновесия электрона на орбите такое же, как и для спутника Земли или планет. В левой части $\frac{mv^2}{r}$ — это центростремительное ускорение электрона (m — масса электрона, v — скорость, а r — радиус орбиты), в правой части — сила, создающая это ускорение, — притяжение электрона ядром, равное по закону Кулона произведению зарядов ядра (Ze) и электрона (e), деленному на квадрат расстояния между ними. Дополнительное условие, введенное Бором, обеспечивает возможность расчета разрешенных орбит электрона, а вся эта процедура называется *квантованием*.

Когда атом испускает квант света с энергией $h\nu_1 = E_2 - E_1$, то электрон переходит с разрешенной орбиты 2 на другую разрешенную орбиту — 1,

Рис. 4. *Слева* — Солнечная система; *справа* — планетарная модель атома. Если электрон в атоме водорода переходит с дальней орбиты (*2*) на ближнюю орбиту (*1*), то атом испускает квант света. При обратном переходе атом должен поглотить квант. Переходы с одной орбиты на другую изображают схемой энергетических уровней. Каждый уровень E_1, E_2, E_3 и т. д. соответствует энергии электрона на орбитах *1, 2, 3* и т. д. Разница между энергиями уровней равна энергии кванта, излучаемого или поглощаемого атомом.

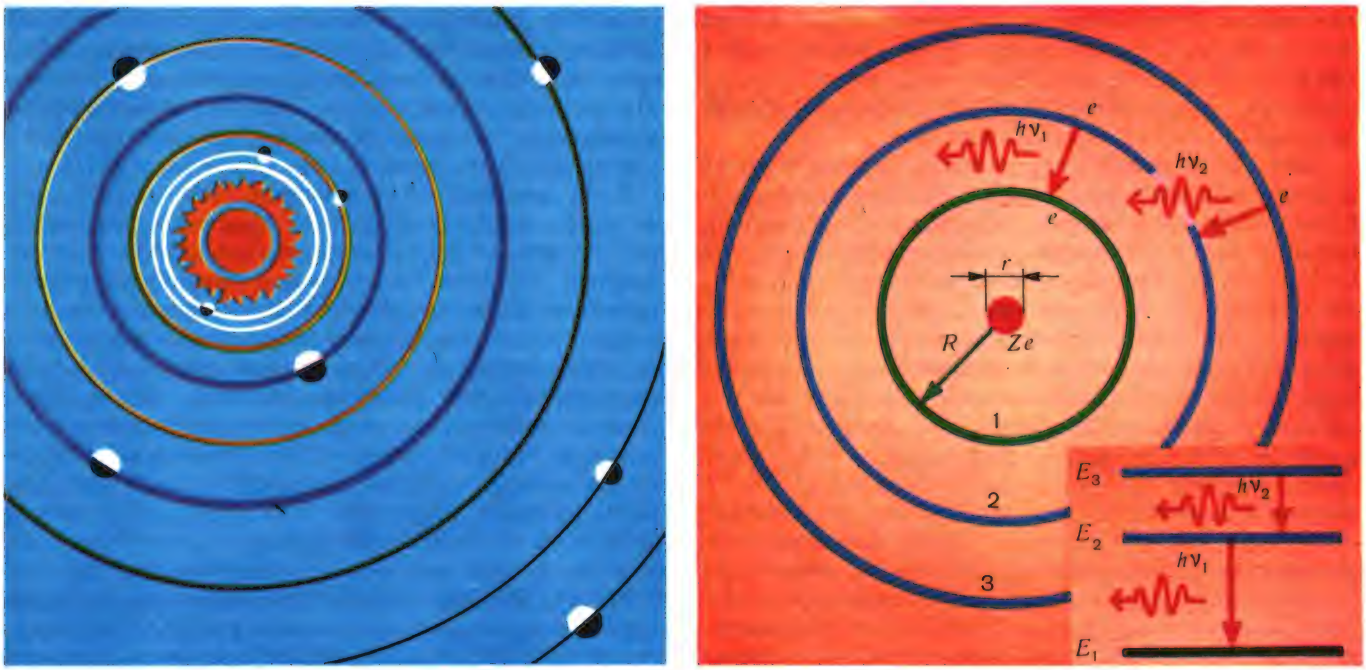
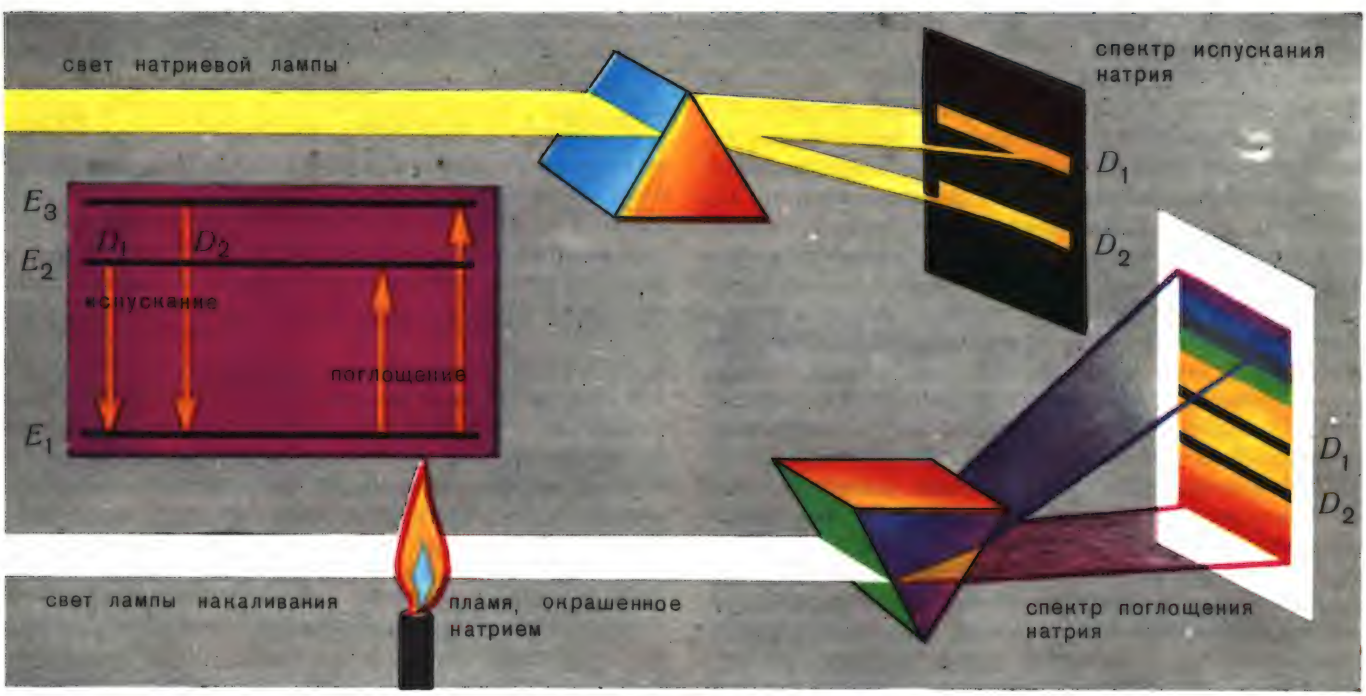


Рис. 5. Излучение и поглощение света атомами натрия.



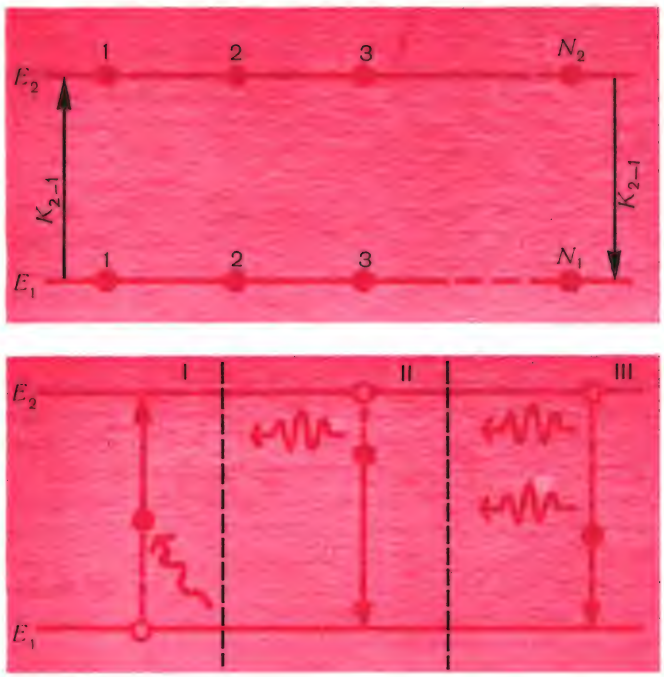


Рис. 6. Схема «квантовой яблони» поможет вам понять рассуждения Эйнштейна. *Внизу: I* — поглощение света; *II* — спонтанное излучение; *III* — индуцированное (вынужденное) излучение.

а атом переходит с энергетического уровня E_2 на энергетический уровень E_1. По спектру свободных атомов и определяют частоты их излучений, а значит, и энергию, выделяющуюся при переходах атома с уровня на уровень,— энергетическое расстояние между уровнями.

Теория Бора — важный шаг в развитии квантовой теории излучения, квантовой механики. Эта теория объяснила процессы, происходящие в атоме при излучении. Она позволила точно «рассчитать» атом водорода. Однако объяснить с той же полнотой излучения сложных атомов она не смогла, несмотря на все попытки ее усовершенствования. Это удалось сделать после создания квантовой механики.

Атомы, содержащие большое число электронов, тоже излучают кванты света и переходят при этом с одного уровня на другой. Так, в спектре атома натрия можно видеть две близко расположенные линии желтого цвета (рис. 5). Эти линии соответствуют световому излучению с длинами волн 0,5896 мкм (эту линию называют D_1) и 0,5890 мкм (линия D_2).

Рассчитав по формуле $h\nu$ энергию квантов, можно построить схему излучения атома натрия. Эта же схема позволяет понять, почему на месте ярких линий D_1 и D_2 в сплошном спектре лампы накаливания появляются темные линии, когда ее свет проходит через пламя, подкрашенное солями натрия.

Теперь расскажем о замечательной работе Эйнштейна, появившейся в 1917 г. В этой работе содержится вывод важнейшей физической закономерности — формулы Планка. В ней же впервые показано, что существует так называемое *вынужденное*, или *индуцированное*, излучение атомов — процесс, на основе которого работают лазеры, самые совершенные известные нам источники света.

Понять рассуждения Эйнштейна непросто. Поэтому читать нужно дальше с карандашом в руках. Но тот, кто решил стать физиком, не пожалеет о затраченном труде. Разве не заманчиво научиться самому выводить первую квантовую формулу, понять, что такое индуцированное излучение, и, наконец, познакомиться с настоящим квантовым расчетом, да еще сделанным самим Эйнштейном! Уже ученик 7 класса справится со всеми математическими выкладками вывода. Полезно только ближе познакомиться с показательной функцией, прочитав статью «Функция в природе и технике» в томе 2 ДЭ.

Из теории Бора следовало, что излучают отдельные атомы. В нагретом твердом теле атомы в сильной степени взаимодействуют между собой. Оказывается, это приводит к тому, что энергетических уровней, с которых атом может излучать, в нагретом твердом теле очень много. Эйнштейн рассмотрел два уровня атома с энергиями E_1 и E_2.

Атом с нижнего уровня E_1 перейдет на верхний E_2 только в том случае, если он поглотит порцию энергии $E_2 - E_1$, или, как теперь говорят, квант $h\nu_{12} = E_2 - E_1$. Попробуем подсчитать число таких переходов, скажем, за одну секунду.

Пусть на земле под яблоней лежит N_1 яблок (рис. 6). Яблоня не обычная, а квантовая. Если в плод, лежащий на земле, попадает квант $h\nu_{12}$, то яблоко поднимается и вновь прирастает к ветке. На N_1 яблок падает $I(\nu)$ квантов в секунду. Вероятность того, что квант попадет в яблоко, равна $S = B_{12}I(\nu)$. В самом деле, если вы стреляете по мишени, то чем больше выстрелов сделано вами (число $I(\nu)$), тем больше шансов попадания в нее. Больше чем $I(\nu)$ попаданий быть не может. Только при абсолютной меткости число попаданий могло бы равняться числу выстрелов $I(\nu)$. Но квантовый обстрел ведется без всякого прицеливания, и вот величина B_{12} учитывает меткость этого обстрела. Конечно, она всегда меньше единицы. Теперь, чтобы получить полное число попаданий квантов в яблоки, нужно величину S умножить на число N_1. Полное число попаданий равно числу переходов земля — ветви за секунду. Эту величину обозначим $K_{1\to2}$, $K_{1\to2} = B_{12}I(\nu)N_1$. Теперь посчитаем, сколько атомов в секунду переходит с верхнего уровня на нижний. Если на дереве N_2 спелых яблок, то, естественно, чем больше N_2, тем больше яблок падает на землю в единицу времени.

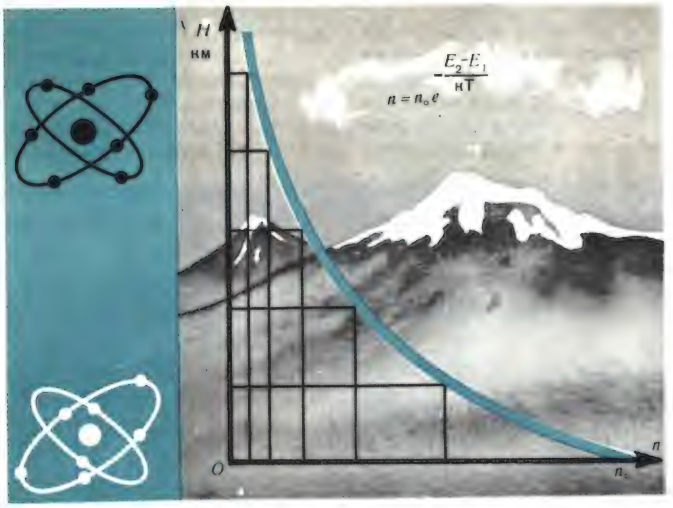


Рис. 7. По закону $n = n_0 e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$ убывает число атомов газа с увеличением высоты над уровнем моря (H). E_2 — потенциальная энергия атома на высоте H, E_1 — потенциальная энергия атома на уровне моря. Эта формула справедлива всегда, когда надо определить зависимость числа атомов от их энергии при условии равновесного состояния системы.

Поэтому число яблок, самопроизвольно (спонтанно, как говорят физики) падающих на землю в секунду, пропорционально числу N_2. Это можно записать так: $K_{2\to 1} = A_{21}N_2$.

Оказывается, на квантовой яблоне число падающих на землю плодов $K_{2\to 1}$ должно равняться числу $K_{1\to 2}$ — числу вновь поднимающихся на ветви. Иначе величина $I(\nu)$ менялась бы во времени, а опыт показывает, что твердое тело, находящееся в температурном равновесии, а именно такое тело мы и рассматриваем, в единицу времени испускает постоянное число квантов $I(\nu)$. Приравняем теперь $K_{1\to 2}$ и $K_{2\to 1}$. Мы получим: $B_{12}N_1I(\nu) = A_{21}N_2$. Решим это уравнение:

$$I(\nu) = \frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1}.$$

Существует замечательный закон: оказывается, если тело находится в тепловом равновесии, то число частиц с энергией E_2 всегда меньше, чем число частиц с энергией E_1, когда $E_2 > E_1$, причем $N_2 = N_1 e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$, или $\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$. Здесь e — основание натуральных логарифмов — число, примерно равное 2,73. Величина kT — средняя кинетическая (точнее, среднеквадратичная) энергия атома тела, нагретого до температуры T. Этот закон можно вывести строго, но доказательство слишком сложное. Между тем эту формулу стоит запомнить, она часто используется при выводе физических закономерностей (рис. 7). Теперь для зависимости силы света от частоты получим выражение $I(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}} e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$. A_{21} и B_{12} просто числа, и, как их ни изменяй, из нашего выражения формула Планка не получится. Но ведь именно формула Планка отражает то, что происходит в природе. В наших рассуждениях тоже нет видимой ошибки. Значит, существует еще какой-то процесс, не учтенный нами. И вот здесь заключена сущность открытия Эйнштейна; он предположил: из верхнего состояния в нижнее (из E_2 в E_1) атом в некоторых случаях может переходить под действием пролетающих мимо него квантов электромагнитного излучения с энергией $h\nu_{12}$, равной энергии перехода $K_{1\to 2}$. По Эйнштейну, такие кванты «вынуждают» атомы испускать себе подобные кванты. Если использовать наши «яблочные» термины, то это означает, что некоторые кванты как-то попадают в яблоки на ветвях и стряхивают их. При этом квант не поглощается, а рождается еще дополнительный квант. Число «попаданий» квантов в атомы N_2 рассчитывается так же, как и число попаданий в атомы N_1: оно равно $B_{21}N_2$. Так что на самом деле число переходов $K_{2\to 1}$ равно $A_{21}N_2$ (число яблок, самопроизвольно падающих с ветвей) плюс $B_{21}N_2$ (число яблок, сбитых с ветвей потоком квантов с энергией $h\nu_{21}$ и интенсивностью $I(\nu)$).

Теперь условие, вытекающее из температурного равновесия твердого тела $K_{1\to 2} = K_{2\to 1}$, нужно записать так:

$$B_{12}N_1I(\nu) = A_{21}N_2 + B_{21}N_2I(\nu).$$

После простых выкладок вы получите

$$I(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{\frac{h\nu}{kT}} - B_{21}},$$

если учтете, что

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{h\nu}{kT}} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}.$$

Эта формула совпадает с формулой Планка, если считать, что $B_{12} = B_{21}$, а отношение $\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2}$. Но ведь формула Планка верна. Следовательно, и соотношения между коэффициентами A_{21}, B_{12} и B_{21}, приводящие к ней, должны быть справедливыми. Эти результаты и были получены Эйнштейном в 1917 г. Если теперь физик измерял скорость поглощения света (число переходов $K_{1\to 2}$ за 1 с), то он уже мог вычислить и скорость вынужденного и самопроизвольного излучений, вычислить величины A_{21}, B_{12} и B_{21} — коэффициенты Эйнштейна, как мы их теперь называем. Рассчитать же теоретически сразу все три коэффициента можно только на основе квантовой электродинамики, науки, созданной через 10 лет после открытия Эйнштейна.

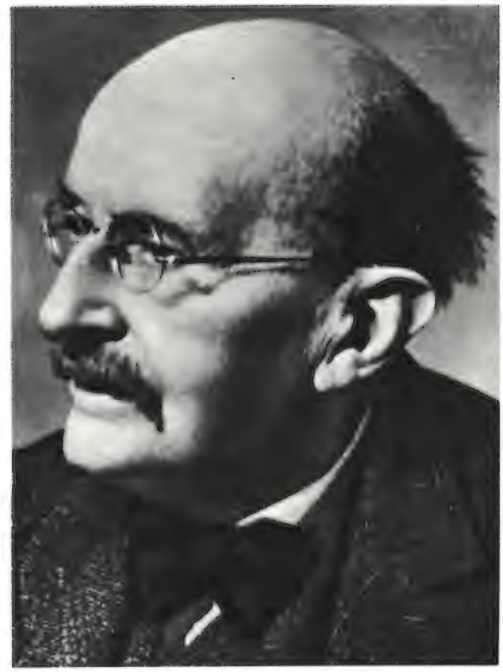
Вынужденное излучение в обычных источниках света играет малую роль. Поэтому если ученый, за-

нимавшийся физической оптикой, говорил, что ему удалось из таких-то опытов определить коэффициенты Эйнштейна, то даже физики его не всегда понимали — бывали случаи, когда его коллегам, специалистам в других областях, казалось, что речь идет об опытах, связанных с проверкой теории относительности!

Потребовалось более 40 лет, чтобы открытое Эйнштейном вынужденное излучение вошло в нашу жизнь и о нем заговорили все. Ведь именно процесс вынужденного, или индуцированного, излучения — основа, на которой удалось создать *мазеры* и *лазеры*, замечательные источники электромагнитного излучения, благодаря которым совершилась революция во многих областях науки и техники.

Квантовая механика «приписывает» свойства частиц электромагнитному излучению. Но и частицы по ее законам должны проявлять в определенных условиях волновые свойства. Это, конечно, подтверждается опытом. Широко известны явления дифракции свободных электронов, нейтронов и других элементарных частиц (см. ст. «Свет»). По квантовым законам длина волны частицы с массой m, движущейся со скоростью v, равна $\frac{h}{mv}$. Так что не только электромагнитные волны обладают свойством частиц. Физик с не меньшей свободой оперирует волнами материи.

Возможно, в этой статье вы не всё поняли до конца. Да это и не удивительно, когда речь идет о проблемах, решавшихся поколениями ученых, о проблемах, приведших к созданию важнейшего раздела современной науки. Поэтому и с такими сложными понятиями сжиться по-настоящему можно, только став физиком.



Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (1858—1947)

Немецкий физик-теоретик, член Берлинской академии наук, лауреат Нобелевской премии (1918). Наиболее важные работы Планка по термодинамической теории теплового излучения. В 1900 г. установил формулу распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела (закон Планка). Пытаясь теоретически обосновать найденную формулу, Планк совершил смелый шаг, введя представления о прерывном, квантовом обмене энергией между излучающими системами. Дальнейшее развитие этой гипотезы привело к установлению теории квантов, играющей важную роль в современном естествознании. Большое значение имеют работы Планка по теории относительности и статистической физике.

Радиофизика

В наше время трудно удивить кого-нибудь такими словами, как «радиолампа», «антенна», «телевизор». А ведь еще в 20-х годах XX в. люди, впервые услышав голос диктора по радио, начинали беспокойно оглядываться, не понимая, где же прячется говорящий человек.

Мы живем в век бурного развития радиофизики и радиотехники. В прошлом веке ученых, работавших в этой области науки, можно было пересчитать по пальцам, а ныне радио проникло в каждый дом, в научные исследования и даже в космос.

Главной задачей радиотехники является *передача информации* на расстояние с помощью электромагнитных волн. Слова «передача информации» выделены потому, что с помощью электромагнитных волн можно передавать не только информацию. На расстояние можно передавать и *энергию*. Это происходит в высоковольтных линиях электропередач и в обычных электропроводах, проложенных по стенам наших домов и квартир, а в новых домах внутри стен. Но это уже не радиотехника, а электротехника.

Рис. 1. Первая в мире радиостанция А. С. Попова. *Слева* — общий вид радиостанции на острове Гогланд.

Радио информирует нас о событиях в мире, о погоде на завтрашний день, о первых шагах космонавтов по поверхности Луны и о процессах, происходящих внутри атомного реактора... Технические средства и методы, с помощью которых это делается, и составляют предмет радиотехники. Много интересного о них вы узнаете из тома 5 Детской энциклопедии.

Мы же сейчас поговорим о менее известном, о том, чем занимается *радиофизика*. Радиофизика — научный фундамент радиотехники. Это наука об основных физических законах и явлениях, используемых для создания и усовершенствования радиотехнических средств, о новых методах генерации и приема радиоволн, о взаимодействии радиоволн с веществом.

Рождение науки

С чего началась радиофизика? Она началась с уравнений, сформулированных в 1873 г. Максвеллом. Хотите на них посмотреть? Вот они:

$$\operatorname{rot}\vec{H}=\vec{j}+\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t},$$

$$\operatorname{rot}\vec{E}=-\mu_0\frac{\partial\vec{H}}{\partial t},$$

$$\operatorname{div}\vec{E}=\frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

$$\operatorname{div}\vec{H}=0.$$

Разобраться в уравнениях Максвелла и научиться их применять без знания высшей математики невозможно. Но даже вид этих уравнений говорит о связи между величинами электрических ($\vec{E}$) и магнитных ($\vec{H}$) полей, электрических токов ($\vec{j}$) и зарядов (ρ); отражает влияние изменений во времени одних величин на другие. Ведь за математическими символами rot и div скрываются распределения соответствующих величин ($\vec{H}$ или $\vec{E}$) в пространстве, а символ $\frac{\partial}{\partial t}$ означает скорость изменения во времени.

Рождение теории Максвелла было подготовлено длительным процессом постепенного накопления результатов многочисленных экспериментов. Вспомним наиболее важные из этих результатов (см. ст. «Электричество и магнетизм»). В 1820 г. Эрстед открыл действие электрического тока на магнитную стрелку, показал, что токи в проводах создают магнитное поле. Эксперименты Био и Савара и Ампера доказали, что и магнитное поле действует на провода с током, и определили силу этого воздействия. Майкл Фарадей открыл в 1831 г. закон электромагнитной индукции, т. е. возникновение электрического поля при всяком изменении магнитного.

Но второе уравнение Максвелла и есть математическая формулировка закона электромагнитной индукции! Оно говорит о том, что изменение во времени магнитного поля $\left(\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}\right)$ создает в окружающем пространстве электрическое поле, причем в разных точках пространства напряженность этого поля различна ($\operatorname{rot}\vec{E}$).

А вот обратное явление — возникновение магнитного поля при всяком изменении электрического — было *предсказано* Максвеллом. До Максвелла первое уравнение выглядело так: $\operatorname{rot}\vec{H}=\vec{j}$, т. е. было известно, что ток ($\vec{j}$) создает в пространстве вокруг себя магнитное поле ($\operatorname{rot}\vec{H}$). Максвелл ввел в это уравнение изменение во времени электрического поля $\left(\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right)$. Эта небольшая на первый взгляд добавка, которую Максвелл назвал током смещения (подробнее о токе смещения см. ст. «Электричество и магнетизм»), вначале была не очень понятна дру-

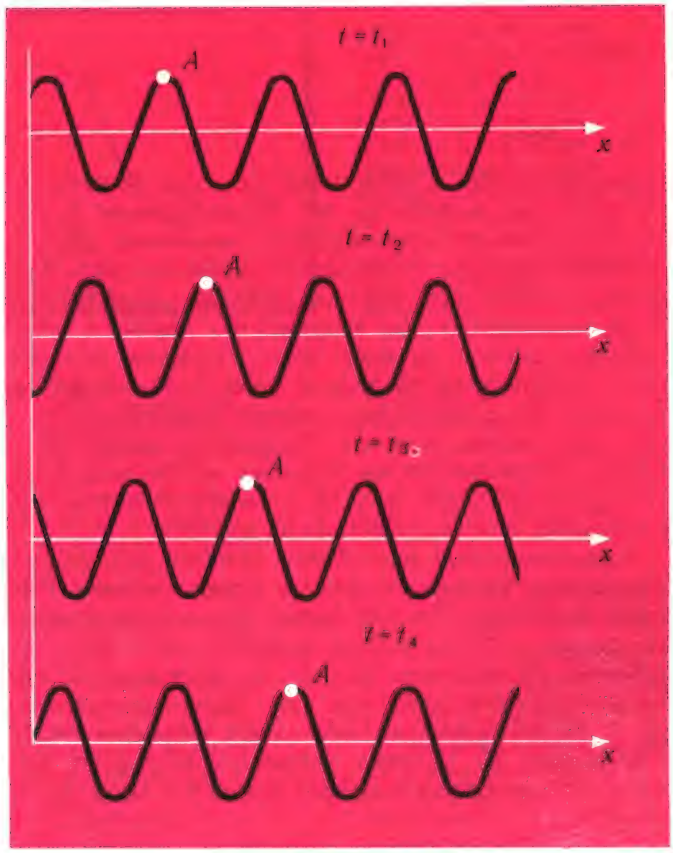


Рис. 2. Четыре последовательные «фотографии» пространственного распределения физической величины s, сделанные в моменты времени t_1, t_2, t_3 и t_4. По перемещению точки A можно судить о распространении волны вдоль оси x.

гим ученым из-за отсутствия подтверждающих ее существование экспериментов. Но она содержала в себе много нового и важного. Она предсказала, что всякое изменение электрического поля сопровождается возникновением магнитного поля. К еще более важным выводам приводит совместное рассмотрение двух первых уравнений. Возникнув, магнитное поле не может исчезнуть. Ведь чтобы исчезнуть, оно должно уменьшиться до нуля, т. е. измениться $\left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\right)$. А из второго уравнения Максвелла следует, что при этом должно возникнуть электрическое поле. Это поле тоже не может исчезнуть, так как, согласно первому уравнению, при изменении электрического поля $\left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right)$ вновь возникнет магнитное поле, и т. д.

Значит, переменные электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, они поддерживают друг друга и могут существовать независимо от создавшего их источника, распространяясь в пространстве в виде электромагнитной волны. В уравнения Максвелла входит и скорость, с которой должна распространяться эта волна. Оказалось, что она равна скорости света! Вот как сказал об этом сам Максвелл: «Едва ли мы можем избежать заключения, что свет — это поперечное волнообразное движение той же самой природы, которая вызывает электрические и магнитные явления».

Ценность научной теории определяется глубиной ее проникновения в сущность явлений, способностью теории объяснить множество уже известных фактов и предсказать множество неизвестных. До Максвелла были известны свет, электричество, магнетизм. Уравнения Максвелла установили тесную связь между этими явлениями, которые раньше казались независимыми, помогли сформулировать такое важнейшее понятие физики, как «электромагнитное поле». Значение их можно сравнить со значением закона всемирного тяготения Ньютона, теории относительности Эйнштейна или модели атома Нильса Бора.

Триумфом теории Максвелла стали в 1886—1889 гг. знаменитые эксперименты Герца. Герц впервые получил электромагнитные волны и осуществил с ними все опыты, характерные для световых волн: отражение от металлического листа, образование «тени» позади этого листа, образование стоячих волн между двумя листами.

А несколько лет спустя, 7 мая 1895 г., выдающийся русский физик А. С. Попов в докладе на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества продемонстрировал опыты по передаче и приему электромагнитных волн и впервые в мире обосновал возможность передачи сигналов на расстояние, т. е. возможность *радиосвязи*. К 1895 г. многие составные элементы, которые впоследствии вошли в систему связи без проводов, были уже известны. Но нужны были глубокие научные знания и ясное понимание возможности и необходимости беспроводной связи, для того чтобы сделать решающий шаг. Этот решающий шаг сделал А. С. Попов: он тщательно изучил все известные приборы, объединил их в единую систему, создал недостающие элементы этой системы, и прежде всего чувствительный и надежно действующий приемник радиоволн, который Попов назвал «прибором для обнаружения и регистрирования электрических колебаний».

А когда радиофизика начала применяться для решения практических задач?

Поздней осенью 1899 г. во время снежной метели броненосец береговой охраны «Генерал-адмирал Апраксин» сел на камни у острова Гогланд в Финском заливе. Для организации спасательных работ необходима была постоянная связь с Гогландом, но от места аварии до ближайшего пункта, имевшего телеграфную связь с Петербургом, было больше 40 км. Проложить кабель мешали льды.

В Морском министерстве были хорошо известны работы А. С. Попова благодаря испытаниям его ап-

паратуры в 1897 и 1898 гг. на кораблях Балтийского флота и в 1899 г. на Черноморском флоте. Поэтому Попову было поручено установить связь с островом Гогланд и ледоколом «Ермак», подошедшим к острову для оказания помощи «Апраксину». В суровые зимние дни сооружались первые в мире радиостанции и антенны (рис. 1). Одна станция была построена на скалистом утесе на Гогланде, неподалеку от потерпевшего аварию броненосца, другая — на острове Кутсало. Расстояние между станциями составляло 45 км. Станция на Кутсало была связана телефонной линией с поселком Котка, где находилась почтово-телеграфная контора.

5 февраля 1900 г. в Котку пришла телеграмма начальника Главного морского штаба: «Котка Гогланд командиру Ермака около Лавенсаари оторвало льдину с 50 рыбаками окажите немедленно содействие снятию этих людей». Хотя работы по наладке радиостанций еще не были завершены, А. С. Попов приказал немедленно передать текст телеграммы на Гогланд. «Ермак» вышел на помощь. Все рыбаки, унесенные льдиной в море, были спасены.

Первая в мире радиограмма была сигналом бедствия, призывом о помощи. В этот день радио впервые пришло на помощь людям.

На следующий день, 6 февраля 1900 г., начался обмен радиограммами, была установлена устойчивая двусторонняя связь. Радиолиния успешно работала до апреля 1900 г., когда «Апраксин» с помощью «Ермака» был снят с камней

Колебания и резонанс

В природе мы очень часто встречаемся с колебаниями. Морские волны и звук скрипки, движение атомов и луч лазера — всё это колебания. У всех этих явлений есть общие закономерности, так что на языке математики описания совершенно различных колебательных процессов не отличаются друг от друга. Изучением этих общих закономерностей занимается *теория колебаний*.

Современная теория колебаний, составляющая основу радиофизики, сложна. Мы познакомимся лишь с некоторыми ее положениями. Вот как записывается простейшее синусоидальное колебание:

$$s = A\sin\omega t.$$

Под s в радиофизике понимается любая электрическая величина: напряжение, сила тока, заряд, напряженность электрического или магнитного поля и т. п.; s — мгновенное значение любой из перечисленных величин. Например, в момент времени t_1 это значение равно $s_1 = A\sin\omega t_1$, в момент времени t_2: $s_2 = A\sin\omega t_2$ и т. д. Если построить график изменения величины s во времени, мы получим синусоиду.

Величины A и ω в нашей формуле остаются неизменными: A — амплитуда колебания, максимальное значение, которого может достигнуть величина s; ω — угловая частота. $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, где f — частота колебаний, а T — их период, т. е. время, за которое совершается одно полное колебание. (В других статьях этого тома вы встретитесь с иным обозначением частоты — буквой ν, но в радиофизике и радиотехнике чаще пользуются для обозначения частоты буквой f.)

Колебание можно *усилить*, т. е. увеличить его амплитуду или мощность. Его можно *модулировать* по амплитуде или частоте, заставляя A или ω меняться в соответствии с изменениями передаваемого сигнала.

Детектирование, или демодуляция, позволяет выделить из модулированного колебания тот закон, по которому оно было промодулировано, т. е. выделить передаваемый сигнал. Можно преобразовать колебание, например понизить или повысить его частоту. И наконец, при наличии колебаний можно наблюдать и использовать резонанс.

Без учета резонанса нельзя проектировать мосты и гавани, строить дома и самолеты, без его использования нельзя конструировать радиоприемники, телевизоры, лазеры, музыкальные инструменты и многое-многое другое.

В мире ежегодно издаются десятки тысяч научных журналов. Если вы возьмете наугад любой из них: физический, химический, биологический — и полистаете его, вы наверняка встретитесь с описаниями различных резонансных явлений. Столь всеобщий характер колебательных и резонансных процессов напоминает о глубокой взаимосвязи всех явлений природы.

Волны

Уравнение синусоидальных колебаний $s = A\sin\omega t$ описывает изменение величины s только во времени. Но из теории и опыта известно, что колебательный процесс может распространяться в простран-

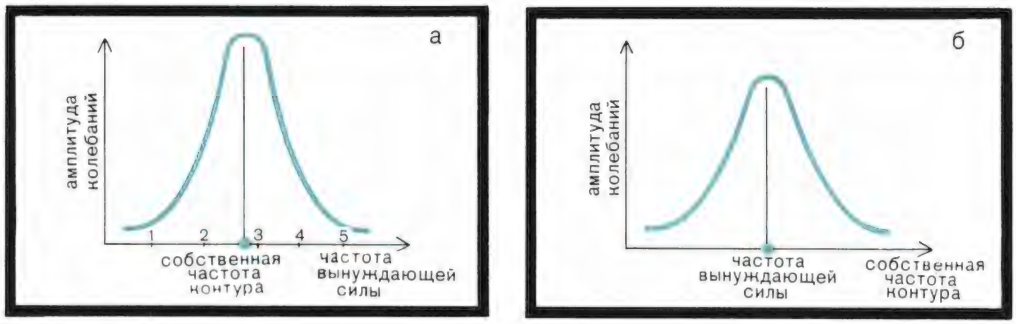


Рис. 3. Два способа наблюдения резонанса: *а* — при неизменной собственной частоте колебательного контура изменяется частота вынуждающей силы. Возьмем, например, несколько камертонов с различными частотами звучания и натянутую музыкальную струну. Отложим на горизонтальной оси частоты камертонов (точки *1, 2, 3, 4, 5*) и собственную частоту колебаний струны (точка 3). Если заставить камертон звучать, то его колебания приведут в колебательное движение молекулы окружающего воздуха. Движение молекул воздуха является вынуждающей силой, заставляющей колебаться и струну. Поднося к струне поочередно камертоны с разными частотами колебаний, мы убедимся, что на звук камертонов *1* и *5* струна не отзовется, так как их частоты слишком далеки от собственной частоты струны. Камертоны *2* и *4* вызовут слабые колебания струны, и лишь камертон *3* заставит струну колебаться с максимальной амплитудой; *б* — при неизменной частоте вынуждающей силы изменяется собственная частота колебательного контура. Возьмем один камертон, частота которого отмечена точкой на оси частот. Собственную же частоту колебаний струны будем менять, ослабляя или усиливая натяжение струны (как это делают при настройке музыкальных инструментов). Колебания максимальной амплитуды возникнут в струне тогда, когда ее собственная частота сравняется с частотой камертона.

стве в виде волны. Предположим, что мы создали колебания в какой-то точке пространства. Тогда в точку, расположенную на расстоянии x от начальной, волна придет через время $\Delta t = \frac{x}{c}$, где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения волны (в нашем случае электромагнитной). В точке x возникнут колебания, описываемые тем же уравнением, но с запозданием Δt: $s = A \sin \omega (t - \Delta t)$, или $s = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c}\right)$. Это и есть уравнение волны, бегущей вдоль оси x со скоростью c. В отличие от предыдущего оно описывает изменение величины s и во времени, и в пространстве.

Чтобы убедиться в этом, зафиксируем сначала x — дадим ему какое-то постоянное значение x_1. Уравнение волны примет вид $s = A \sin \omega \left(t - \frac{x_1}{c}\right)$, т. е. величина s будет зависеть только *от времени*. Значит, в любой точке на оси x величина s совершает колебания с частотой $f = \frac{\omega}{2\pi}$ и периодом $T = \frac{1}{f}$. Колебания в разных точках сдвинуты по фазе, т. е. достигают максимума или минимума в различные моменты времени.

Теперь зафиксируем t, как бы сфотографируем распределение величины s *в пространстве* вдоль оси x в определенный момент времени t_1. Несколько последовательных изображений в моменты t_1, t_2, t_3, t_4 показывают, что синусоида бежит, распространяется вдоль оси x (рис. 2). Это легко заметить, если следить за какой-то ее определенной точкой, например за одним из максимумов. Впрочем, вы все это не раз видели на поверхности воды.

Изменяющееся во времени, т. е. движущееся, пространственное чередование максимумов и минимумов любой физической величины и называется в физике *волной*.

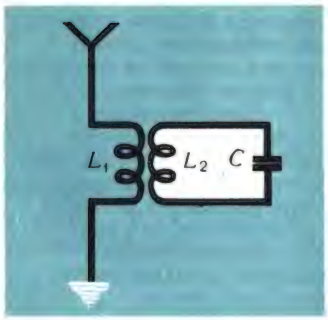
Расстояние между двумя ближайшими максимумами или минимумами называется *длиной волны* λ. Расстояние λ волна проходит за один период: $\lambda = cT$. Заменим T на $\frac{1}{f}$. Мы получим важное соотношение $\lambda = \frac{c}{f}$, связывающее длину электромагнитной волны с ее частотой. Чем выше частота, тем короче длина волны. Радиопередатчик, излучающий волну длиной 1000 м, работает на частоте $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{1000} = 300$ кГц. А в красном луче рубинового лазера ($\lambda = 0{,}69$ мкм) электромагнитное поле совершает колебания с частотой

$$f = \frac{3 \cdot 10^8}{0{,}69 \cdot 10^{-6}} \approx 4{,}3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

Собственные и вынужденные колебания

Колебания часто являются *вынужденными*, т. е. происходят под воздействием переменных внешних сил. Действие ветра заставляет колебаться ветви деревьев и водную поверхность, землетрясения вызывают колебания земной коры, падающие на предмет световые волны заставляют колебаться электроны в атомах вещества, из которого состоит предмет.

Если внешняя сила меняется периодически, например по синусоидальному закону, то частота вынужденных колебаний обычно совпадает с частотой вынуждающей силы. Но любая колебательная система обладает и собственными частотами колебаний — одной или несколькими. Если маятник дли-



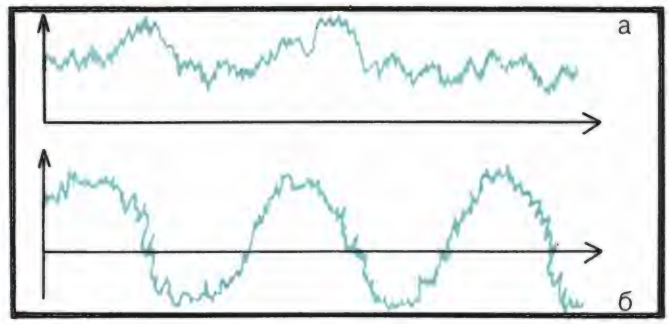


Рис. 4 *(слева)*. Настройка приемника на частоту радиостанции осуществляется перестройкой L—C-колебательного контура.

Рис. 5. Сигнал с наложенными на него шумами: *а* — слабый сигнал почти неразличим на фоне шумов; *б* — сигнал велик по сравнению с шумами.

ной l отклонить, а потом отпустить, предоставить самому себе, он будет колебаться с собственной частотой, зависящей только от длины маятника и равной $f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$ (g — ускорение свободного падения).

Оттянутая и отпущенная струна или тетива лука колеблется с собственной частотой $f=\frac{1}{2l}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$, где l — длина струны, ρ — плотность ее материала и σ — натяжение, т. е. отношение силы, растягивающей струну, к площади ее поперечного сечения.

Если зарядить конденсатор, имеющий емкость C, а потом подключить к нему катушку с индуктивностью L, конденсатор начнет разряжаться, и через катушку пойдет ток. Заключенная между обкладками конденсатора энергия электрического поля перейдет в энергию магнитного поля катушки. Затем энергия магнитного поля вновь перейдет в энергию электрического поля, и конденсатор опять зарядится, но уже в противоположном направлении: знаки зарядов на обкладках поменяются местами. Возникнет колебательный процесс с собственной частотой $f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, определяемой параметрами колебательного контура, т. е. величинами емкости и индуктивности.

Не получая энергии извне, собственные колебания постепенно затухают из-за наличия трения, сопротивления воздуха, электрического сопротивления проводов и других сил, препятствующих колебательному движению. Для поддержания незатухающих колебаний нужно подводить энергию извне.

Отложим на графике (рис. 3, *а*) по оси абсцисс частоту вынуждающей силы, а по оси ординат амплитуду вынужденных колебаний. Это могут быть, например, частота переменной э. д. с., питающей наш контур, и амплитуда колебаний напряжения на емкости. При приближении частоты вынуждающей силы к собственной частоте колебательной системы амплитуда колебаний резко возрастает. Это и есть резонанс.

Возбуждая колебания с помощью э. д. с., имеющей маленькую амплитуду, можно получить при резонансе во много раз большую амплитуду колебаний напряжения в контуре. Теоретически амплитуда могла бы возрастать до бесконечности, но на практике этого, разумеется, не происходит, так как с ростом амплитуды колебаний увеличиваются и потери энергии на преодоление сил сопротивления.

Можно, наоборот, при неизменной частоте вынуждающей силы (э. д. с., питающей контур) менять собственную частоту контура, сближая или раздвигая пластины конденсатора, т. е. изменяя его емкость. Результат получится тот же самый — при совпадении частот собственных колебаний и вынуждающей силы колебания резко усилятся, наступит резонанс (рис. 3, *б*).

Как осуществляется настройка приемника на частоту принимаемой станции? Во входном каскаде приемника стоит колебательный контур, частоту которого можно менять изменением емкости (или индуктивности). Вынуждающей силой являются колебания электромагнитного поля, принимаемые антенной и преобразуемые ею в колебания тока и магнитного поля в катушке L_1, а благодаря взаимоиндукции и в катушке L_2 (рис. 4).

При совпадении частот станции и контура в нем возникают колебания, которые после усиления и детектирования преобразуются в звуковые колебания динамика. Передачи других станций происходят на других частотах и не вызывают колебаний во входном контуре приемника.

Чем резче возрастает амплитуда колебаний при резонансе, тем острее резонансная кривая, тем выше качество, или, как говорят, добротность, контура. В контурах с высокой добротностью собственные колебания после прекращения действия вынуждающей силы затухают очень медленно.

Шумы и спектры

На рисунке 5, *а* дана запись шума. Но это не обязательно шум зрителей на трибунах стадиона или шум автотранспорта на улицах города. Если установить ручку настройки радиоприемника так, чтобы ни одна станция не была слышна, а потом включить максимальную громкость, можно услышать шум и треск, хотя никто не создает его специально, — наоборот, от него стараются избавиться.

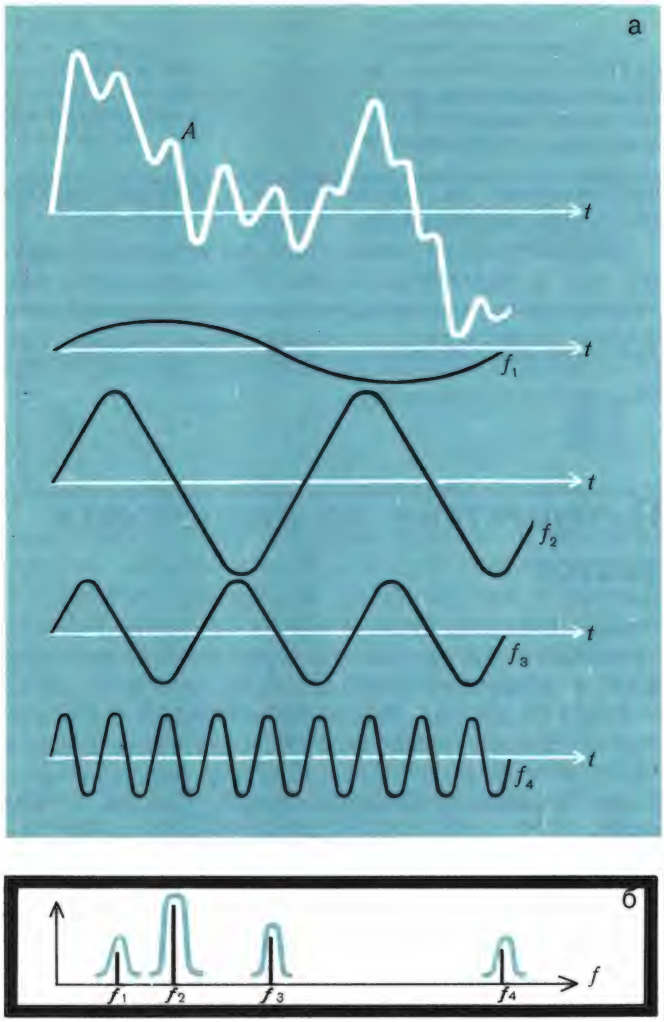


Рис. 6. Спектры радиосигналов: *а* — сложное колебание *A* является суммой четырех простых колебаний с частотами f_1, f_2, f_3 и f_4; *б* — колебания в перестраиваемом контуре, на вход которого подан сложный сигнал *A*.

Физики называют шумом любое сложное, непериодическое колебание, не обязательно звуковое. Бывают и неслышные шумы. Шумы есть всегда — ведь кроме шумов, создаваемых вольно или невольно людьми и различными механизмами и приборами, в природе всегда есть свои колебания, которые обычно носят беспорядочный, хаотический характер. Эти беспорядочные колебания и создают шумы. Например, в радиолампах сила анодного тока, т. е. количество электронов, попадающих на анод за единицу времени, неточно соответствует изменениям напряжения, управляющего работой лампы. Всегда есть *флуктуации*, т. е. случайные отклонения силы анодного тока от среднего значения, которые вызваны неравномерностью вылета электронов из катода. А в кристаллах полупроводниковых приборов атомы совершают беспорядочные тепловые колебания вблизи узлов кристаллической решетки, что отражается на работе приборов.

Таким образом, радиоаппаратура обладает собственными, или *внутренними*, шумами. *Внешние* шумы создаются атмосферными помехами (грозами и другими процессами в атмосфере) и различными электроустановками. Радиоволны от них улавливаются антенной вместе с полезным сигналом.

Если полезный сигнал велик, шумы почти не мешают (рис. 5, *б*). Слабый сигнал различить на фоне шумов трудно. Трудно, но можно. Подадим синусоидальный сигнал с наложенным на него шумом на колебательный контур и начнем перестраивать собственную частоту контура. Сильные колебания возникнут в контуре лишь на частоте, равной частоте сигнала, «спрятанного» в шум.

Если сигнал совсем слабый, то и этот метод не помогает его различить. Тогда нужно начинать борьбу с шумами. Например, внутренние шумы можно уменьшить благодаря применению специальных входных каскадов приемника, охлаждаемых до температуры, близкой к абсолютному нулю. При охлаждении беспорядочные тепловые колебания атомов в твердых телах почти прекращаются, а ведь они являются одним из основных источников внутренних шумов. Чтобы уменьшить влияние внешних шумов, применяют узконаправленную антенну, ориентированную в ту сторону, откуда приходит сигнал. Шумов, приходящих с других направлений, такая антенна не чувствует. Кроме того, самые чувствительные радиоприемные устройства (например, для дальней космической связи) размещают вдали от городов и промышленных предприятий, т. е. от мест, где много электродвигателей и других электрических устройств, создающих шумы.

Полностью избавиться от шумов невозможно, поэтому существует большая область радиофизики — *статистическая радиофизика*, одной из основных задач которой является разработка методов выделения сигналов из шумов. В основе этих методов лежит анализ *частотных спектров* сигнала и шума.

Оказывается, колебание любой сколь угодно сложной формы можно представить как сумму большого числа простых синусоидальных колебаний с различными амплитудами и частотами. Например, сложное колебание (рис. 6, *а*) получилось при сложении четырех синусоидальных колебаний разных амплитуд и частот. Если это сложное колебание подать на перестраиваемый колебательный контур, то в контуре будут возникать резонансные колебания каждый раз, когда его частота будет совпадать с частотой одной из синусоид, причем амплитуда колебаний будет пропорциональна амплитуде соответствующей синусоиды (рис. 6, *б*).

Обычно вместо резонансных кривых рисуют просто «частокол» линий разной длины. Этот частокол и есть частотный спектр сигнала. Колебательный контур выделяет из спектра ту линию, на которую он настроен (рис. 7).

Рис. 7. Анализ спектра сложного сигнала: *а* — частотный спектр сложного сигнала *А*, показанного на рисунке 6; *б* — резонансная кривая колебательного контура, настроенного на одну из линий спектра сигнала; *в* — спектр сигнала после прохождения его через колебательный контур — это спектр одной синусоиды с частотой f_3.

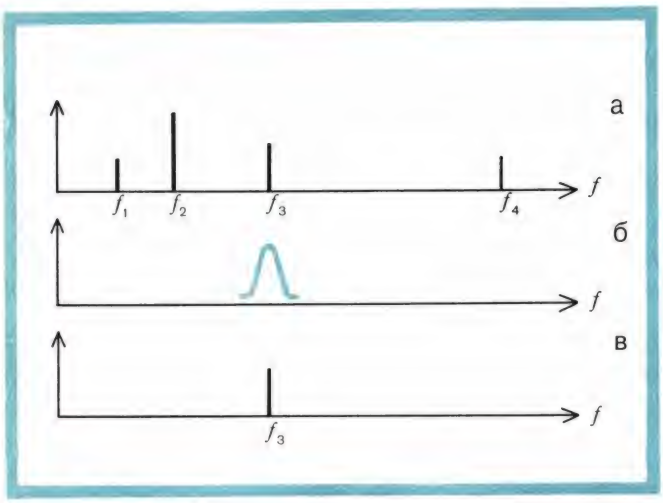
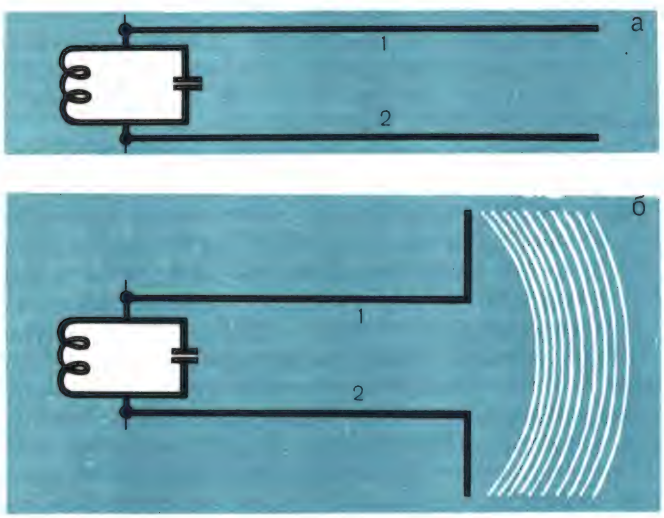


Рис. 8. Принцип работы антенны: *а* — электрические заряды из колебательного контура частично переходят в проводники *1* и *2*; *б* — расстояние между концами проводников стало соизмеримо с длиной волны — получилась антенна, излучающая радиоволны.



Простая синусоида имеет частотный спектр в виде одной линии. Такая синусоида не несет в себе никакой информации. Для передачи информации колебание модулируют, а модулированное колебание уже обладает сложным спектром. Сложнее информация — шире спектр передаваемых колебаний.

При передаче речи или музыки по радио ширина спектра сигнала, т. е. разница частот между крайними линиями спектра,—10 кГц, а при телевизионной передаче — около 5 МГц. Телевизионная станция занимает на шкале частот в 500 раз больше места, чем радиостанция.

Понятие спектра имеет столь же всеобщий характер, как и понятие резонанса. В спектр можно разложить не только радиоколебания, но и свет. Это широко используется в спектральном анализе (см. ст. «Свет»). Можно получить спектр звуковых и любых других колебаний.

Путешествие по диапазонам частот

Первые передачи Попова велись на длинах волн в несколько сотен метров. Развитие телевидения привело к широкому использованию ультракоротких волн (от 10 до 1 м). Радиолокация работает в основном на сантиметровых волнах. В последнее время в науке и технике все шире используются миллиметровые и даже субмиллиметровые (короче 1 мм) волны.

Радиоволны различных диапазонов по-разному генерируются и принимаются, по-разному распространяются в атмосфере, по-разному взаимодействуют с веществом. Каждый диапазон обладает своими особенностями. Чтобы лучше понять эти особенности, нужно вспомнить две формулы. Первая связывает длину радиоволны с ее частотой: $\lambda = \frac{c}{f}$. Вторая вам тоже известна — это формула резонансной частоты колебательного контура: $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Без колебательного контура, являющегося основой большинства радиотехнических устройств, обойтись нельзя. В своем обычном виде, т. е. в виде соединенных друг с другом конденсатора и катушки, этот контур вполне пригоден в диапазонах длинных, средних и коротких волн, т. е. от 10 км до 10 м (от 30 кГц до 30 МГц).

Прикинем, каковы должны быть L и C, например, на волне 50 м (частота $f = 6$ МГц $= 6 \cdot 10^6$ Гц). По формуле резонансной частоты контура можно получить величины $L = 7 \cdot 10^{-5}$Г $= 70$ мкГ и $C = 10^{-11}$Ф $= 10$пФ. Конечно, можно было бы взять и другие L и C, например меньшую индуктивность и большую емкость. Но оказывается, что чем меньше L, тем шире резонансная кривая контура, тем ниже его добротность, а это плохо — такой контур, поставленный в радиоприемник, будет ловить сразу несколько станций. Если же попытаться увеличить L и уменьшить C, это помешают сделать *паразит-*

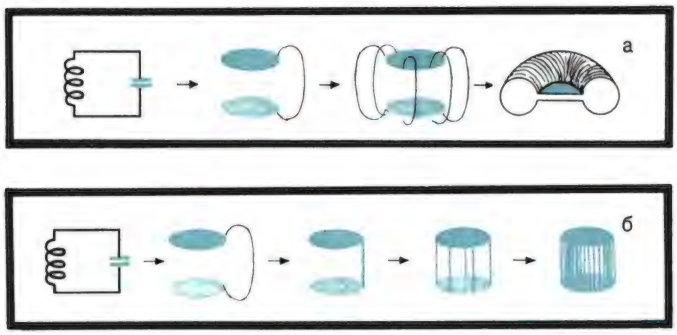


Рис. 9. Полые резонаторы: *а* — переход от колебательного контура, состоящего из конденсатора и катушки индуктивностей, к полому резонатору на сверхвысоких частотах. Такой резонатор называется тороидальным. На рисунке он показан в разрезе; *б* — переход от L — C-контура к цилиндрическому полому резонатору.

ные емкости соединительных проводов и витков катушки, которые входят в общую емкость контура.

Одной из важнейших характеристик в радиофизике является соотношение между геометрическими размерами контура и длиной волны колебаний в нем. Например, размеры контура, емкость и индуктивность которого мы только что рассчитали, составляют несколько сантиметров при длине волны 50 м, т. е. во много раз меньше длины волны. Это очень важно — оказывается, что в этом случае колебания происходят внутри контура и не излучаются наружу.

Если в воздухе колеблется с достаточной частотой какая-либо пластинка, то от нее расходятся во все стороны звуковые волны. А в нашем контуре электрические колебания происходят, но электромагнитные волны от него не расходятся. И все это благодаря его маленьким по сравнению с длиной волны размерам.

А как же «извлечь» волну из контура? Присоединим к нему два проводника (рис. 8, *а*). Электрические заряды из контура частично перейдут в проводники, так что между проводниками будут происходить колебания электрического поля той же частоты, что и в контуре. Но из проводников волны почти не будут излучаться, так как расстояние между ними много меньше длины волны. Отогнем концы проводников в стороны. Вот теперь расстояние между их концами уже соизмеримо с длиной волны — получилась *антенна*, излучающая радиоволны (рис. 8, *б*).

Вот почему в линиях электропередач применяется ток низкой частоты — 50 Гц. Длина волны такого тока $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300\,000}{50} = 6000$ км, а расстояние между проводами всего несколько дециметров. Если же электростанции вырабатывали бы ток, скажем, частотой 1 000 000 000 Гц, или 1 ГГц (длина волны 30 см), то передача электроэнергии *по проводам* была бы невозможной — по пути от станции к городам и заводам почти вся электроэнергия «улетучилась» бы, излучилась бы из проводов в окружающее пространство.

Мы подчеркнули слова «по проводам», потому что есть, оказывается, другие способы передачи, которые позволяют передавать на значительные расстояния энергию сантиметровых (частота больше 3 ГГц) и даже миллиметровых (частота больше 30 ГГц) волн.

Сверхвысокие частоты

Самый интересный диапазон в радиофизике — это диапазон сверхвысоких частот (СВЧ). Он интересен и необычными методами генерации и передачи волн, и своими разнообразными применениями в науке и технике.

Бурное развитие техники и приборов СВЧ было вызвано прежде всего потребностями радиолокации. А сейчас эти приборы широко применяются во многих областях науки и техники. В научно-исследовательских институтах, ведущих исследования по физике твердого тела и полупроводников, по квантовой электронике, акустике, физике плазмы, астрономии, химии, биологии и многим другим научным проблемам, можно увидеть скромный прибор, по виду и размерам напоминающий обычную радиолампу, только не в стеклянном, а в металлокерамическом баллоне. Это генератор колебаний СВЧ — *клистрон*.

К СВЧ относятся волны с частотами выше 300 МГц. Их подразделяют на дециметровые (от 300 до 3000 МГц), сантиметровые (от 3000 до 30 000 МГц) и миллиметровые (от 30 000 до 300 000 МГц) волны. В диапазоне СВЧ мы имеем дело уже не с напряжениями и токами в проводниках, а с электромагнитными полями. Именно здесь начинают по-настоящему «работать» уравнения Максвелла. Без них не обойтись.

А что стало в диапазоне СВЧ с колебательным контуром?

Применять контур в его обычном виде здесь нельзя по той же причине, по которой нельзя передавать колебания СВЧ по проводам — размеры контура становятся соизмеримы с длиной волны, поэтому растут и потери на излучение, а значит, ухудшается форма резонансной кривой контура, снижается его добротность.

Кроме того, для коротких волн, например для $\lambda = 1$ см ($f = 30$ ГГц), изготовить обычные емкости

Рис. 10. Многократные отражения в полированных стенках волновода.

и индуктивности просто невозможно. Ведь они должны здесь быть очень маленькими: L около 0,001 мкГ и C около 0,03 пФ. А индуктивность катушки, состоящей всего из одного витка, составляет около 1 мкГ, т. е. в 1000 раз больше. Да и емкость 0,03 пФ сделать невозможно — одна лишь паразитная емкость соединительных проводников составляет обычно не меньше 2—3 пФ.

Значит, нужно отказаться от соединительных проводников и включить несколько витков параллельно друг другу — индуктивность n параллельных витков в n раз меньше, чем индуктивность одного витка (рис. 9, *а*). Если продолжать увеличивать n для уменьшения резонансной частоты контура, отдельные витки в конце концов сольются друг с другом и образуют сплошную стенку. Получится замкнутая полость, *полый резонатор*.

А можно сделать по-другому. Индуктивность прямого проводника меньше, чем у витка, а у нескольких параллельных проводников индуктивность еще меньше. В конце концов и в этом случае получится полый резонатор (рис. 9, *б*). Существует много различных форм и конструкций полых резонаторов. Они заменили на СВЧ обычный колебательный контур.

Внутри резонатора происходят колебания электромагнитного поля, а потерь энергии на излучение нет, так как поле не может проникнуть наружу сквозь металлические стенки. Правда, есть другие потери. Колебания электромагнитного поля наводят индукционные высокочастотные токи в стенках резонатора, и, если стенки недостаточно гладкие, они оказывают этим токам большое сопротивление. Энергия колебаний теряется на разогрев стенок.

Поэтому внутренние стенки резонаторов тщательно обрабатывают, а в самых лучших резонаторах полируют до зеркального блеска и покрывают тонкой пленкой золота или серебра. Как обычная низкочастотная радиотехника не может обойтись без колебательного контура, так и техника СВЧ невозможна без полых резонаторов.

Неожиданное применение полого резонатора предложил академик П. Л. Капица. Если заполнить резонатор дейтерием под давлением в несколько десятых мегапаскаля (несколько атмосфер) и возбудить в нем мощные СВЧ колебания, то электромагнитное поле ионизует атомы дейтерия и превратит газ в плазму. Под действием СВЧ колебаний по плазме потекут переменные сверхвысокочастотные токи, которые разогреют плазму, зажгут в ней высокочастотный разряд. Возможно, что, комбинируя СВЧ нагрев с воздействием на плазму постоянных и переменных магнитных полей, удастся разогреть

Рис. 11. Излучение СВЧ волны из волновода с помощью рупора.

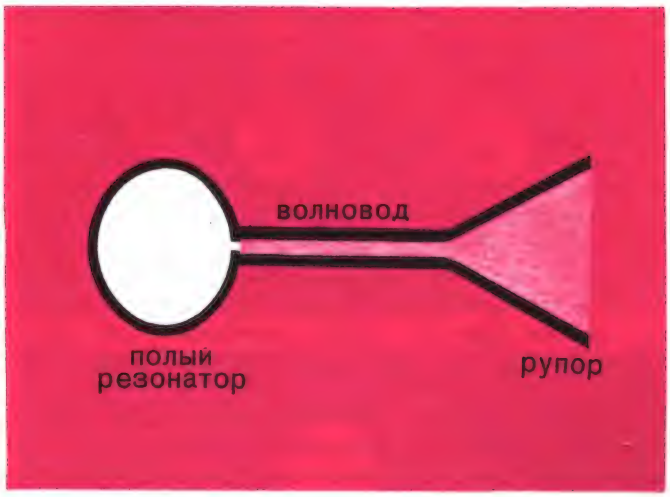


Рис. 12. Приемные телевизионные антенны «смотрят» в направлении телецентра.

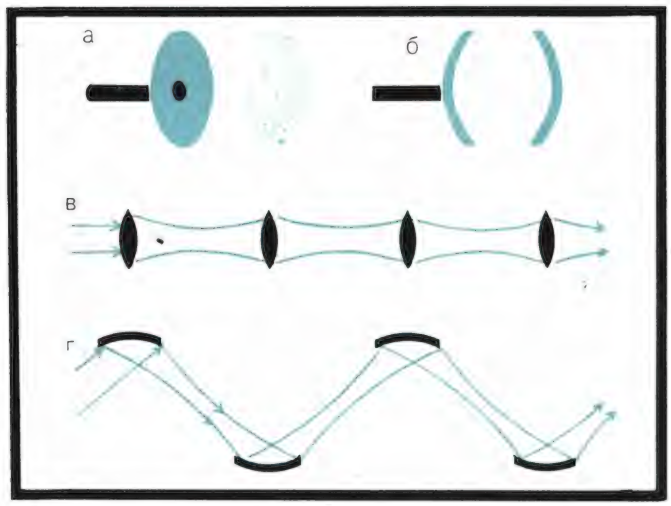


Рис. 13. Открытые резонаторы и открытые волноводы:
а — открытый резонатор с плоскими зеркалами; *б* — со сферическими зеркалами; *в* — линзовая линия; *г* — зеркальная линия.

ее до термоядерных температур и осуществить таким путем управляемый термоядерный синтез. В статье «Плазма и термоядерный синтез» рассказывается о других путях решения проблемы управляемого синтеза, но и эти пути предполагают использование СВЧ энергии в качестве дополнительного источника для разогрева плазмы.

Собственную частоту колебаний полого резонатора (обычно он имеет не одну, а много собственных частот, но одна из них является основной) можно перестраивать, меняя размеры резонатора, например сделав одну из стенок подвижной или вдвигая и выдвигая из резонатора металлический стержень.

А как же вывести колебания из полого резонатора? Вот здесь мы и познакомимся со способом передачи СВЧ энергии. Линия передачи на СВЧ больше похожа на... водопровод, чем на электрическую линию. Электромагнитные волны передаются по трубам! Если сделать в стенке резонатора щель и припаять к резонатору в этом месте металлическую трубу, часть заключенной в резонаторе энергии электромагнитного поля выйдет через щель, и по трубе побежит электромагнитная волна.

Возможность такой передачи рассматривал еще Рэлей в конце XIX в. А теперь эти трубы — *волноводы* — можно встретить повсюду, как и уже упоминавшийся генератор СВЧ — клистрон. Правда, волноводы чаще применяются не круглые, а прямоугольного сечения.

Чем меньше длина волны, тем меньше и размеры площади сечения волновода. Волны длиной 10 см передают по волноводам сечением 72×34 мм, трехсантиметровые — по волноводам 23×10 мм, а четырехмиллиметровые — по волноводам $3 \times 1{,}5$ мм. С уменьшением рабочей длины волны уменьшаются и размеры резонаторов.

Внутренние поверхности волноводов, как и внутренние поверхности резонаторов, требуют тщательной обработки. Посмотреть сквозь такой волновод на просвет очень интересно — стенки его блестят как зеркала, видимые сквозь волновод предметы многократно отражаются в этих зеркалах и образуют причудливые сочетания, как в калейдоскопе (рис. 10).

Если охладить стенки волновода так, чтобы они стали сверхпроводящими (см. ст. «На подступах к абсолютному нулю»), то потери энергии от высокочастотных токов в стенках исчезнут и по волноводу можно будет передавать СВЧ энергию на большие расстояния без потерь. Возможно, что в будущем волноводные линии передачи придут на смену высоковольтным воздушным линиям.

Попробуем теперь вывести СВЧ волну из волновода. Длина волны в волноводе соизмерима с размерами его поперечного сечения, поэтому часть энергии волны излучается просто из открытого конца волновода. Но это невыгодно, так как часть энергии отражается от конца и уходит по волноводу обратно. Чтобы энергия не отражалась, конец волновода делают расширяющимся, в виде рупора (рис. 11).

Если к рупору, излучающему мощный СВЧ сигнал, поднести неоновую лампочку, она загорится: СВЧ волна возбуждает молекулы газа и он начинает светиться. Человеку нельзя находиться перед таким рупором — мощное СВЧ излучение вредно действует на организм.

Антенны

Как источник света в прожекторе располагают в фокусе зеркального отражателя, так и рупор, излучающий СВЧ волны, помещают в фокусе параболической антенны, для того чтобы получить направленное излучение. Одна и та же антенна часто используется и для излучения, и для приема электромагнитных волн. Принимаемые волны фокусируются металлическим зеркалом антенны на рупор и через рупор и волновод направляются к приемнику. Размеры зеркала направленных антенн должны во много раз превышать длину излучаемых или принимаемых волн. Например, для сантиметровых и миллиметровых волн делают антенны диаметром 20—30 м и больше. Узконаправленные антенны необходимы для радиолокации, радиорелейных линий связи, связи с космическими кораблями, для радиоастрономии. Кстати, сам по себе рупор тоже является антенной. Но направленность у такой антенны гораздо хуже, чем у параболической.

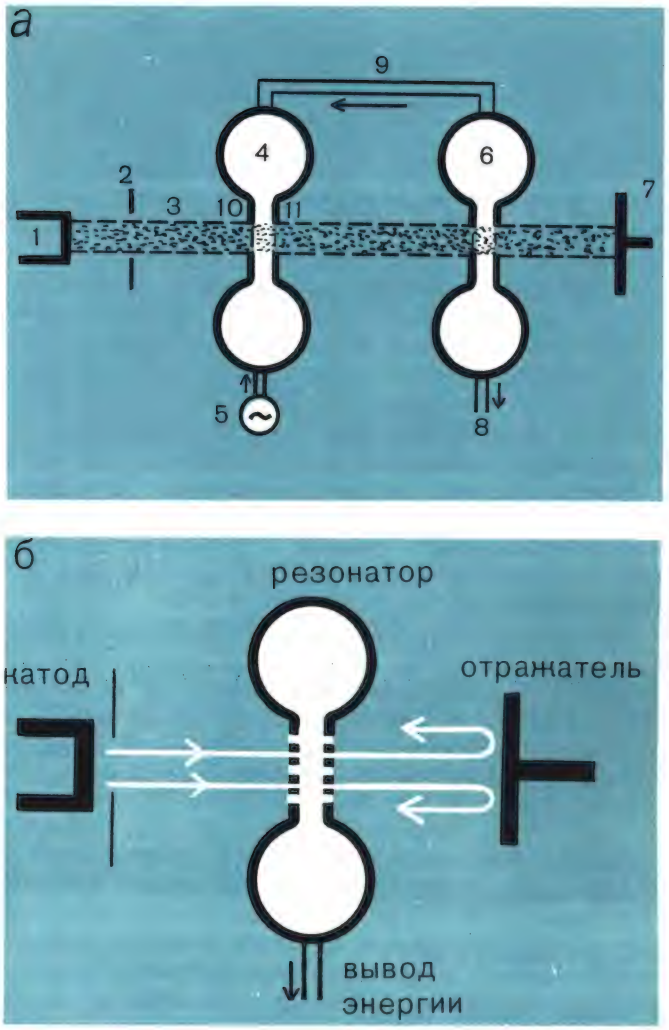


Рис. 14. Устройство клистрона:
а — двухрезонаторного;
б — отражательного.

Антеннам радиовещательных станций направленность обычно не нужна — волны от радиовещательных станций и телецентров должны улавливаться приемниками, расположенными со всех сторон. А вот приемные антенны телевизоров — направленные. В этом вы легко убедитесь, посмотрев на крыши соседних домов: все приемные антенны «смотрят» в одну сторону — в сторону передающей антенны (рис. 12).

Разработка принципов создания антенн для разных применений и для разных диапазонов частот — важный раздел радиофизики.

Квазиоптика

Уже из сравнения направленной антенны с прожектором видна близость методов, применяемых на сверхвысоких частотах, к оптическим методам. С уменьшением длины волны оптические свойства СВЧ волн приобретают все большее значение. Особенно широко *квазиоптические* (почти оптические) методы применяются в субмиллиметровом диапазоне, где длины волн составляют доли миллиметра (частота выше 300 ГГц). Ведь субмиллиметровый диапазон граничит с инфракрасным диапазоном, а это уже свет, хотя и невидимый.

Поставим параллельно друг другу две хорошо отполированные металлические пластинки диаметром 10—20 см. Если к маленькому отверстию в одной из них присоединить волновод, излучающий субмиллиметровые волны (рис. 13, *а*), то эти волны отразятся от второй пластинки, вернутся к первой, отразятся от нее, вновь направятся ко второй пластинке и т. д. В пространстве между пластинками возникнут колебания электромагнитного поля, которые почти не будут уходить в стороны, несмотря на отсутствие боковых стенок.

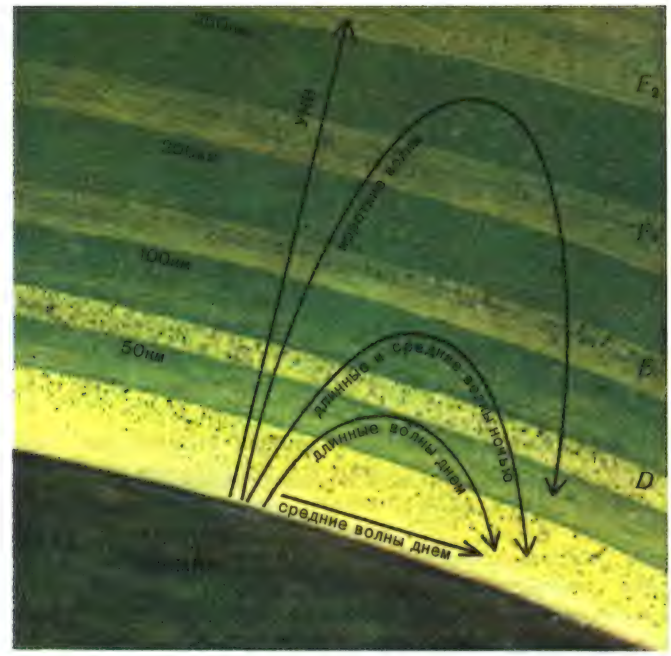
Мы получили новый тип резонатора, который называется *открытым резонатором*. Еще лучше работает открытый резонатор с вогнутыми зеркалами — в нем потери на излучение из пространства между зеркалами в стороны меньше (рис. 13, *б*). Есть и другие типы открытых резонаторов.

Открытые резонаторы пришли в субмиллиметровом диапазоне на смену обычным полым резонаторам, которые здесь применять нецелесообразно. На миллиметровых волнах открытые резонаторы тоже используются. Применять их на более длинных волнах нет смысла, так как размеры их были бы слишком велики. Ведь если размеры обычного контура много меньше его рабочей длины волны, а размеры полого резонатора соизмеримы с длиной СВЧ волны, то размеры открытого резонатора должны во много раз превышать длину волны. Это напоминает оптику, где размеры линз, зеркал и других элементов аппаратуры во много раз превышают длину световой волны.

Кстати, открытые резонаторы широко применяются и в оптике. Рубиновый стержень или любое другое рабочее вещество лазера обязательно помещается между двумя параллельными зеркалами, т. е. внутри открытого резонатора (в оптике такой резонатор принято называть интерферометром Фабри — Перо).

Субмиллиметровые волны, как и свет, можно фокусировать линзами. Только линзы делают не из стекла, а из тефлона и других диэлектриков. Из ряда расположенных на общей оси на расстоянии друг от друга длиннофокусных диэлектрических линз можно составить линию передачи нового типа — *линзовую линию* (рис. 13, *в*). Пучок электромагнитных волн, пройдя через первую линзу, на

Рис. 15. Строение ионосферы и ее воздействие на радиоволны различных диапазонов.

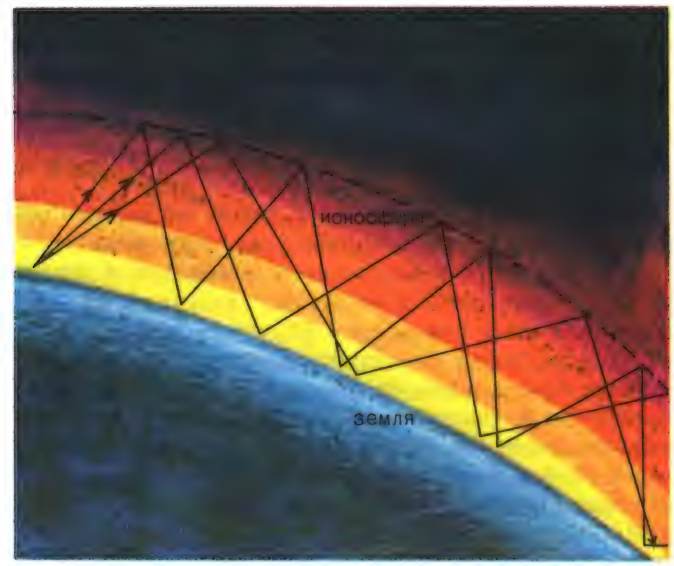


пути ко второй линзе сначала сужается благодаря фокусирующему действию первой линзы, но потом начинает расширяться из-за дифракции электромагнитных волн. Но тут он попадает на вторую линзу, которая вновь подфокусирует пучок, не давая электромагнитной энергии уходить в стороны от направления распространения. Так электромагнитные волны и идут от линзы к линзе. Лишь небольшая часть их энергии рассеивается в стороны и поглощается в материале линз.

Вместо обычных волноводов, которые на волнах короче 1 мм почти не применяются из-за увеличения потерь энергии в стенках и трудностей изготовления волноводов малого сечения, мы получили *открытый волновод*.

Другой распространенный тип открытого волновода очень похож на открытый резонатор — он состоит из периодически расположенных вогнутых металлических зеркал (рис. 13, *г*). Пучок электромагнитных волн путешествует между этими зеркалами, причем каждое зеркало подфокусирует пучок.

Рис. 16. Благодаря отражениям от ионосферы и от поверхности Земли сигналы коротковолновой радиостанции могут приниматься в удаленных точках Земли.



Как генерируют радиоволны

В основе любого метода генерации, усиления или приема электромагнитных волн лежит взаимодействие этих волн с веществом. Например, в обычных радиолампах и в генераторах колебаний СВЧ используется взаимодействие электромагнитных колебаний с потоками электронов в вакууме. Такие приборы называются *электровакуумными*.

Вы уже знаете, что колебательный процесс должен получать энергию извне, иначе колебания затухнут. Электроны в электровакуумных приборах разгоняются постоянным анодным напряжением, приобретают кинетическую энергию и передают часть этой энергии колебанию. В квантовых генераторах и усилителях используется уже не кинетическая энергия электронов, а внутренняя энергия атомов или молекул.

Радиофизики всегда стремились и стремятся к освоению новых диапазонов частот. А что значит освоить новый диапазон? Это значит, прежде всего, создать генераторы и приемники волн этого диапазона.

Сначала были освоены длинные, средние и короткие волны. Каждый шаг к увеличению генерируемой частоты давался радиофизикам нелегко, но в конце концов они достигли блестящего успеха — создали квантовые генераторы, т. е. продвинулись от частот 30 кГц (длинные волны) до 1000 ТГц (лазеры). (О принципах действия различных типов квантовых приборов см. статьи «Свет» (лазер), «На подступах к абсолютному нулю» (квантовый усилитель), «Радиофизика» (молекулярный генератор); о генераторах на радиолампах и полупроводниках см. т. 5 ДЭ, ст. «Радиотехника и электроника».)

А сейчас познакомимся с работой одного из типов генераторов СВЧ — *клистрона* (рис. 14, *а*). Элек-

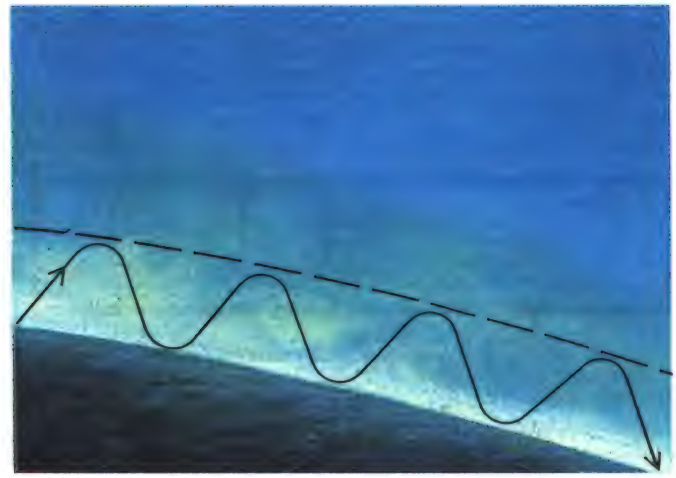


Рис. 17. Сверхдальнее распространение ультракоротких волн в приземном слое воздуха — атмосферном волноводе.

тронная пушка, состоящая из катода (*1*) и ускоряющего электрода (*2*), создает пучок электронов (*3*), который попадает во входной резонатор (*4*). Такой резонатор вам уже знаком — только здесь в центральной части вместо сплошных пластинок стоят металлические сетки, через которые беспрепятственно пролетают электроны.

Если возбудить во входном резонаторе слабые СВЧ колебания с помощью постороннего источника (*5*), то между двумя сетками резонатора возникнут колебания электрического поля. В течение половины периода это поле направлено от сетки (*10*) к сетке (*11*) и тормозит пролетающие через резонатор электроны. Во второй половине периода направление поля меняется на противоположное. Такое поле ускоряет электроны. Влетают в резонатор все электроны приблизительно с одинаковыми скоростями, а вылетают — с разными. Резонатор модулирует скорости электронов.

На пути ко второму резонатору быстрые электроны догоняют медленные, и вместо равномерного электронного потока образуются группы или сгустки электронов, причем сгустки эти следуют друг за другом с периодом, равным периоду колебаний в первом резонаторе.

Образование сгустков или группировка электронов означает, что через второй резонатор (*6*), который настроен на ту же частоту, что и первый, проходит не постоянный ток электронов, а переменный высокочастотный ток. Поле этого тока возбуждает во втором резонаторе колебания той же частоты, что и в первом, но значительно большей амплитуды. Амплитуда их тем больше, чем мощнее поток электронов и чем лучше они сгруппированы. Отдав часть своей кинетической энергии колебаниям, электроны оседают на коллекторе (*7*). Колебания выводятся из выходного резонатора по волноводу (*8*).

Вот мы и получили усилитель СВЧ — двухрезонаторный усилительный клистрон. Его легко превратить в генератор, если ввести *обратную связь*, т. е. подать небольшую часть мощности колебаний с выхода на вход, из второго резонатора в первый по волноводу (*9*). Теперь посторонний сигнал нам не нужен. При работе клистрона в качестве генератора источник входного сигнала (*5*) отсутствует. Ведь в электронных приборах всегда есть шумы. В клистроне источником шума является электронный поток — уже перед первым резонатором он сам по себе не вполне однороден, а значит, окружен переменным электромагнитным полем. Это поле состоит из бесчисленного множества колебаний различных частот, среди которых есть и колебания с частотой, равной собственной частоте первого резонатора. Они возбуждают собственные колебания резонатора — это приводит к группировке электронов, пролетающих через него, а значит, к возбуждению более мощных колебаний во втором резонаторе. Часть мощности по линии обратной связи поступит обратно в первый резонатор, это улучшит группировку электронов и приведет к дальнейшему усилению колебаний во втором резонаторе. Нарастание колебаний во втором резонаторе прекратится лишь после того, как электронный поток сгруппируется полностью.

Еще проще устроен *отражательный* клистрон. Именно его мы имели в виду, когда упоминали о широком использовании приборов СВЧ в самых различных областях науки. В отражательном клистроне всего один резонатор (рис. 14, *б*). Он модулирует скорости электронов, а затем готовые сгустки электронов возвращаются в него же. Их заворачивает назад отражатель — электрод, на который подано отрицательное напряжение. Возвращаясь назад, сгустки электронов отдают часть своей энергии колебаниям в резонаторе. Обратная связь осуществляется здесь самим электронным потоком.

Усиление колебаний рабочей частоты, содержащихся в шумах, и применение обратной связи — общий принцип большинства генераторов электромагнитных волн, и не только в диапазоне сверхвысоких частот.

Радиоволны в атмосфере

Путь от передающей антенны к приемной радиоволны совершают в атмосфере Земли. Атмосфера довольно капризна. Движение облаков, дожди и снегопады, грозы и штормы, изменения, происходящие в атмосфере при переходе от дня к ночи и от лета к зиме, и другие атмосферные явления влияют

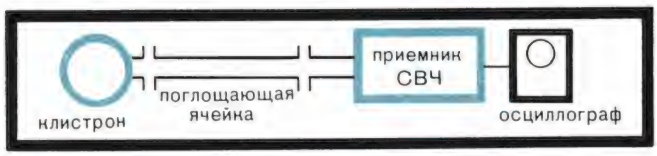


Рис. 18. Устройство радиоспектроскопа. Торцы поглощающей ячейки закрыты стеклянными или керамическими окнами, прозрачными для СВЧ волн. Воздух из поглощающей ячейки откачивается, и она заполняется исследуемым газом.

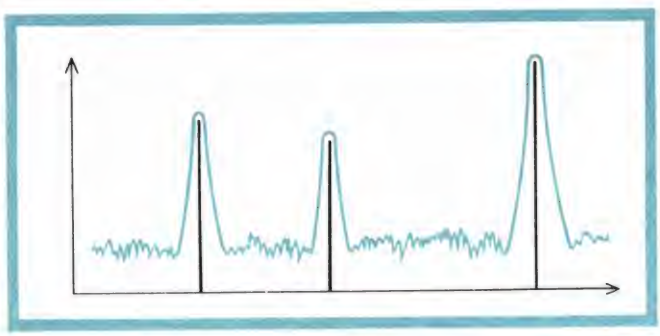


Рис. 19 *(внизу)*. Вид спектра поглощения, записанного с помощью радиоспектроскопа.

на распространение радиоволн. Изучение распространения радиоволн — важный раздел радиофизики.

Для радиофизика наибольший интерес представляют *тропосфера*, т. е. нижний слой атмосферы (высота верхней границы тропосферы 8—12 км), и *ионосфера* (расположена между высотами 80 и 800 км) — область, где атмосферные газы частично ионизованы действием солнечного излучения.

Ионосфера изменчива, она состоит из нескольких слоев, обозначаемых буквами D, E, F_1 и F_2 (рис. 15), причем нижний слой D существует только днем, пока светит Солнце. Меняется в зависимости от времени суток и степень *ионизации* (т. е. концентрация заряженных частиц — электронов и ионов) других слоев ионосферы. Поэтому и условия радиосвязи днем и ночью различны. Например, короткие волны делятся на «ночные» и «дневные». Ночью связь на большие расстояния в коротковолновом диапазоне легче установить на волнах от 50 до 100 м, а днем — от 10 до 50 м.

Состояние ионосферы зависит не только от времени суток, но и от времени года, географического положения, активности Солнца... В разных точках земного шара работают специальные станции, которые следят за ионосферой. По данным этих станций можно предсказать состояние ионосферы и составить прогноз распространения радиоволн на несколько месяцев вперед. Такие прогнозы издаются в нашей стране и в других странах и помогают выбрать наилучшие условия для радиосвязи.

Длинные волны хорошо отражаются от Земли и нижнего слоя ионосферы, которые являются для волн этого диапазона как бы двумя стенками волновода. По волноводу Земля — ионосфера длинные волны могут распространяться на расстояния в несколько тысяч километров.

Длинноволновые радиостанции работают на длинах волн, не превышающих 20—25 км. Однако в природе есть источник сверхдлинных волн — до 35—100 км и более. Этот источник — разряды молний. Возбуждаемые молниями радиосигналы называются *атмосфериками*. В любой точке земного шара можно в любую минуту зарегистрировать несколько таких сигналов. Изучение атмосфериков дает дополнительные сведения о свойствах ионосферы.

Средние волны днем сильно поглощаются нижним слоем D ионосферы и могут распространяться только вдоль земной поверхности, огибая земной шар за счет дифракции. После захода Солнца слой D исчезает, а следующий слой E ионосферы отражает средние волны, поэтому ночью к прямой волне, распространяющейся вдоль поверхности Земли, добавляются волны, отраженные от ионосферы. Благодаря отраженным волнам связь на средних волнах возможна ночью на более далекие расстояния. Однако из-за интерференции отраженных волн с прямой и друг с другом принимаемый сигнал временами ослабевает. Это явление называют *федингом* или замиранием сигнала.

Связь на длинных и средних волнах довольно устойчива и мало подвержена влиянию атмосферных помех. Но эти волны постепенно затухают по мере удаления от передающей радиостанции, поэтому для связи на большие расстояния (более 1000 км) нужны очень мощные радиостанции. А вот на коротких волнах даже сигнал маленькой радиолюбительской станции при благоприятных условиях можно принять в любой точке земного шара. Короткие волны могут многократно отражаться от ионосферы и поверхности Земли и огибать нашу планету (рис. 16). Но поскольку короткие волны отражаются в основном от верхнего слоя ионосферы F_2, они наиболее чувствительны к всевозможным изменениям, происходящим в ионосфере. Показанная на рисунке 15 структура ионосферы нестабильна и под действием вспышек солнечного излучения может временно нарушаться. Это приводит к внезапным ухудшениям условий радиосвязи на коротких волнах. Бывает даже, что радиосвязь на коротких волнах днем полностью исчезает на время от нескольких минут до нескольких часов.

Ультракороткие волны — короче 5—7 м — и СВЧ волны свободно проходят сквозь атмосферу. Именно на этих волнах осуществляется связь с космическими кораблями. В этом же диапазоне длин волн работает и радиоастрономия, изучающая радиоизлуче-

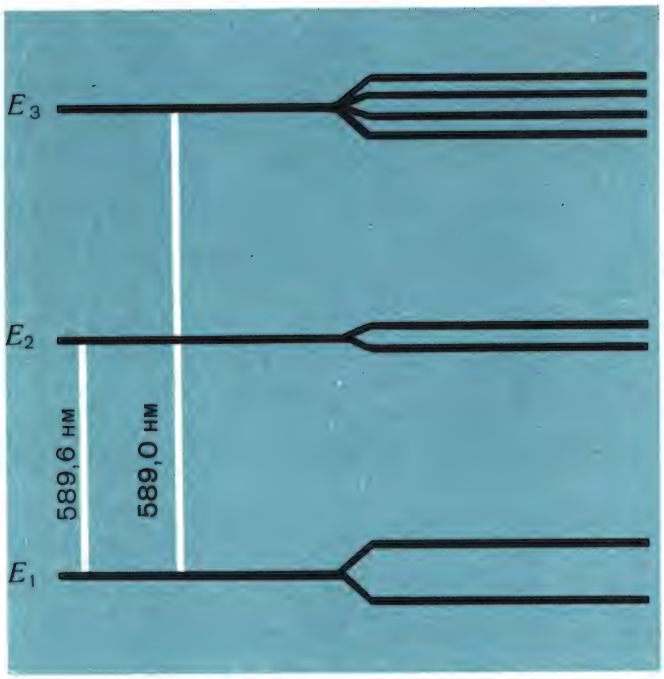


Рис. 20. Расщепление желтых спектральных линий натрия (λ_1=589,0 нм и λ_2=589,6 нм) на близко расположенные подуровни. Такое расщепление наблюдается, если светящиеся пары натрия поместить в магнитное поле. Расщепление спектральных линий в магнитном поле называется эффектом Зеемана. Спектральные линии могут расщепляться и в электрическом поле — это явление называют эффектом Штарка.

ние небесных тел (см. т. 2 ДЭ, ст. «Как работают астрономы»). Среди излучений небесных тел встречаются электромагнитные волны любых диапазонов — и длинные, и СВЧ, и субмиллиметровые, и световые, и ультрафиолетовые, и даже рентгеновские. Это обнаружено приборами, установленными на искусственных спутниках Земли. Атмосфера же не пропускает большую часть этих волн к Земле.

В атмосфере есть всего два «окна»: в области видимого света и в области УКВ и СВЧ. Первым «окном» люди пользуются уже тысячи лет, глядя на звезды в телескопы, подзорные трубы или просто невооруженным глазом. А вот «радиоокно» было обнаружено лишь в XX в. благодаря применению в астрономии радиофизических методов.

При наземной связи УКВ и СВЧ волны распространяются в тропосфере лишь в зоне прямой видимости, поэтому телевизионные антенны стараются поднять как можно выше. Но иногда и эти волны могут приниматься далеко за линией горизонта. При некоторых значениях температуры и влажности они распространяются в приземном слое воздуха толщиной несколько сотен метров, не выходя за пределы этого слоя, как в волноводе (рис. 17). Этот слой называют *атмосферный волновод*.

Поглощение и рассеяние радиоволн каплями дождя, снежинками, облаками и другими неоднородностями атмосферы помогают метеорологам изучать атмосферу и предсказывать погоду.

Радиоспектроскопия

Радиоволны частично поглощаются в атмосфере, причем на разных частотах это поглощение различно. Значит, радиоволна как-то взаимодействует с атомами и молекулами газов, из которых состоит атмосфера. Взаимодействие радиоволн с веществом можно изучать в лабораторных условиях.

Присоединим к генератору СВЧ волн — клистрону — отрезок волновода, заполненный каким-либо газом, а к другому концу волновода подключим приемник СВЧ (рис. 18). При одной и той же генерируемой мощности величина принимаемого сигнала будет разной для разных частот колебаний и для разных газов. Такой прибор называется *радиоспектроскопом*, а наука, изучающая взаимодействие радиоволн с веществом,— *радиоспектроскопией*.

Радиоспектроскопия родилась благодаря применению радиофизических методов для изучения строения вещества. Она оказывает огромную помощь физикам, химикам и биологам в изучении структуры атомов и молекул.

Известно, что внутренняя энергия атомов и молекул квантована, т. е. может принимать лишь строго определенные значения, называемые энергетическими уровнями. При переходе атома или молекулы из состояния с более высокой энергией E_2 в состояние с более низкой энергией E_1 выделяется квант электромагнитной энергии $hf = E_2 - E_1$, где h — постоянная Планка (см. ст. «Волны и кванты»). А при переходе с более низкого на более высокий энергетический уровень энергия поглощается. Обычно в любом веществе большая часть атомов и молекул находится на более низких энергетических уровнях. Поэтому при прохождении электромагнитных волн через вещество чаще происходят энергетические переходы снизу вверх, чем сверху вниз, и в результате энергия волны поглощается.

Поглощение это носит резонансный характер. Если менять частоту генератора радиоспектроскопа, то выходной сигнал будет представлять собой *спектр поглощения* (рис. 19). Поглощаются только радиоволны с частотами, соответствующими возможным энергетическим переходам. Если, например, атом имеет три возможных уровня энергии E_1, E_2, E_3, то резонансное поглощение радиоволн будет происходить только на частотах $f_1 = \frac{E_2 - E_1}{h}$, $f_2 = \frac{E_3 - E_2}{h}$ и $f_3 = \frac{E_3 - E_1}{h}$. Волны других частот проходят через

Первые слова во Вселенной

1962 год ознаменовался в истории событием особой важности. Первые слова человека во Вселенную были: «Ленин», «Мир», «СССР».

«...Советским ученым впервые в истории человечества 19 и 24 ноября 1962 г. удалось осуществить радиосвязь через планету Венера. Переданное с Земли телеграфным кодом 19 ноября слово МИР достигло планеты Венера, отразилось от нее и, пройдя общее расстояние 81 миллион 745 тысяч километров, через 4 минуты 32,7 секунды было принято на Земле.

Этим же методом 24 ноября на Венеру были переданы слова ЛЕНИН и СССР. Отразившись от поверхности планеты, через 4 минуты 44,7 секунды эти слова были приняты на Земле. Они прошли в космосе 85 миллионов 360 тысяч километров!» («Правда» от 29 декабря 1962 г.).

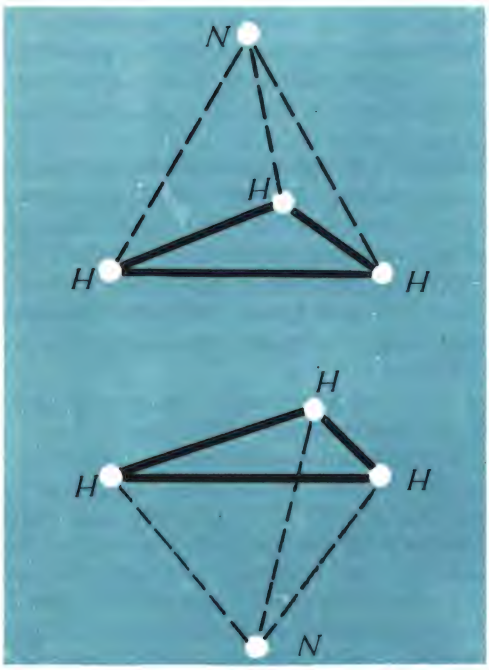


Рис. 21. Два возможных состояния молекул аммиака NH_3.

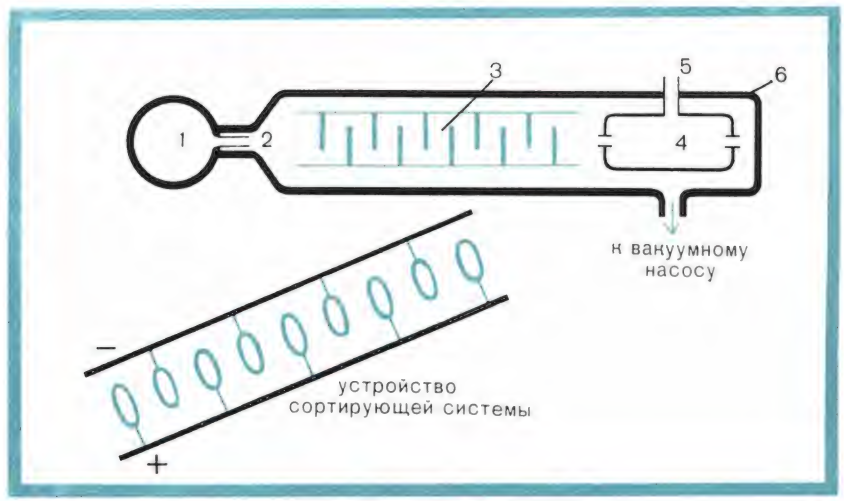


Рис. 22. Устройство молекулярного генератора: *1* — баллон с аммиаком; *2* — капилляр; *3* — сортирующая система; *4* — полый резонатор; *5* — волноводный вывод энергии; *6* — корпус генератора. Генератор охлаждается снаружи жидким азотом, поэтому невозбужденные молекулы аммиака, отклоненные в стороны сортирующей системой, намерзают изнутри на стенки корпуса, как водяные пары намерзают на стенки морозильной камеры в холодильнике. И так же как холодильник, молекулярный генератор надо время от времени «размораживать», т. е. прекращать охлаждение его корпуса и откачивать вакуумным насосом молекулы аммиака, испаряющиеся при этом со стенок.

данное вещество почти без поглощения. Они не взаимодействуют с атомами этого вещества.

У каждого вещества своя структура энергетических уровней, а значит, и свой спектр поглощения электромагнитных волн, отличающийся от спектров поглощения любых других веществ.

Радиоспектроскопия аналогична спектральному анализу в оптике (см. ст. «Свет»). Но есть между ними и разница. Частоты волн, применяемые в радиоспектроскопии, значительно ниже частот световых волн. Благодаря относительно малым частотам, а значит и малым энергиям квантов радиоизлучения, радиоспектроскопия позволяет исследовать энергетические переходы между очень близко расположенными уровнями. Например, два энергетических уровня, расположенных далеко друг от друга, разница энергии между которыми соответствует энергии светового кванта, легко обнаруживаются с помощью оптического спектроскопа. Но если эти уровни обладают *тонкой структурой*, т. е. расщепляются на несколько близко расположенных подуровней (это бывает очень часто), то оптический спектроскоп этого «не видит». Здесь не обойтись без радиоспектроскопа (рис. 20).

Исследование резонансных частот, формы и ширины спектральных линий (т. е. резонансных кривых) в радиодиапазоне позволяет физикам и химикам определить структуру молекул и атомов, характер взаимодействия между ними и даже структуру атомных ядер. Благодаря высокой разрешающей способности радиоспектроскопия дает возможность распознать и отличить друг от друга химические вещества, неотличимые другими методами. Даже спектры таких похожих друг на друга молекул, как $^{14}N = ^{15}N = ^{16}O$ и $^{15}N = ^{14}N = ^{16}O$, имеют максимумы поглощения на разных частотах: 25 121,56 МГц и 24 274,60 МГц, что позволяет легко отличить одни молекулы от других.

В современной химической лаборатории без радиоспектроскопа не обойтись. Портативные радиоспектроскопы созданы для анализа атмосферных газов, что помогает вести борьбу с загрязнением воздуха в городах и крупных промышленных районах.

Радиоспектроскопия основана на измерении частоты, которое является наиболее точным из всех видов измерений. Недаром за эталон секунды сейчас принято время, равное 9 192 631 770,0 периодам электромагнитных колебаний, соответствующих переходу между двумя очень близко расположенными энергетическими подуровнями атома цезия (см. ст. «Всему миру — одну меру»). Иначе говоря, атом цезия имеет в своем спектре поглощения линию на частоте 9 192 631 770,0 Гц (длина волны несколько больше 3 см), т. е. в диапазоне СВЧ.

Радиоспектроскоп — основной элемент *атомных, или квантовых, часов*. Фактически в квантовых часах измеряется частота, а не время, поэтому их называют также *квантовыми стандартами частоты*.

Первый стандарт частоты, или времени, создал английский ученый Л. Эссен. За создание этого прибора Академия наук СССР в 1959 г. наградила Л. Эссена Золотой медалью имени А. С. Попова. От первой радиопередачи Попова до стандартов частоты огромной точности — такой путь прошло радио меньше чем за 60 лет.

Квантовая радиофизика

Радиоспектроскопические исследования подготовили почву для рождения квантовой электроники, или квантовой радиофизики. Слово «радиофизика» недаром стоит в названии этой бурно развивающейся области современной науки и техники. Ведь именно радиофизики создали первые квантовые генераторы — в 1954 г. советские ученые, лауреаты Ленинской (1959) и Нобелевской (1964) премий Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них американские ученые Ч. Таунс, Дж. Гордон и Х. Цейгер. Все они до этого работали в области радиоспектроскопии.

Первые квантовые генераторы были молекулярными — работали на пучке молекул аммиака. В молекуле аммиака три атома водорода расположены в вершинах равностороннего треугольника, а атом азота может занимать одно из двух положений: над плоскостью треугольника или под ней (рис. 21). В пучке молекул аммиака энергии этих двух состояний несколько отличаются друг от друга, что дает в спектре поглощения аммиака линию на частоте 23 870,129 МГц (длина волны около 1,26 см).

В соответствии с законами термодинамики большая часть молекул должна находиться на более низком энергетическом уровне. Но оказывается, что молекулы, находящиеся на разных энергетических уровнях, по-разному ведут себя в электрических полях, поэтому их можно сортировать, т. е. отделять друг от друга с помощью электрических полей.

Пучок молекул, вылетающих из баллона с аммиаком (*1*) через капилляр (*2*), проходит сквозь сортирующую систему *(3)* (рис. 22). Она может, например, состоять из ряда металлических колец, к которым поочередно приложено высокое напряжение противоположной полярности. Пролетая через такую систему, молекулы, находящиеся в возбужденном состоянии, т. е. на верхнем энергетическом уровне, собираются к оси системы, а молекулы, находящиеся на нижнем уровне, отклоняются в стороны и не участвуют в работе генератора. На выходе из сортирующей системы большая часть молекул находится в возбужденном состоянии. Пролетая через полый резонатор *(4)*, молекулы переходят с верхнего уровня на нижний и испускают при этом электромагнитное излучение. Оно возбуждает собственные колебания полого резонатора, который настроен на ту же частоту — 23 870,129 МГц. Следующие возбужденные молекулы, влетающие в резонатор, встречаются с уже существующими там колебаниями электромагнитного поля и усиливают эти колебания, отдавая им свою энергию. Генерируемая мощность выводится из резонатора по волноводу *(5)*.

В стандартах частоты на атомах цезия используется излучение от постороннего СВЧ генератора, а частота линии поглощения определяется с помощью радиоспектроскопа. Такие стандарты называются *пассивными*. Молекулярный же генератор сам генерирует колебания строго постоянной частоты и может использоваться для создания *активных* стандартов частоты.

Кроме того, молекулярный генератор является высокочувствительным радиоспектроскопом — только излучаются в нем не спектры поглощения, а *спектры излучения*. (В оптике также изучают оба типа спектров: спектры раскаленных тел являются спектрами испускания и состоят из светлых полос на темном фоне, а спектры, получаемые при прохождении через вещество излучения от постороннего источника, являются спектрами поглощения и состоят из темных полос на светлом фоне.) Молекулярный генератор был первым прибором, который возвестил о рождении других квантовых приборов: лазеров, сверхчувствительных квантовых усилителей и др.

Радиофизикам принадлежит разработка методов голографии с использованием лазеров (см. ст. «Свет»). Можно ожидать, что в скором будущем эти методы приобретут столь же широкое распространение в науке и технике, какое уже приобрели сейчас полупроводники, лазеры, искусственные спутники Земли.

Радиофизике предстоят новые открытия

Весь мир слышал по радио голос Юрия Гагарина: «Полет проходит нормально».

Весь мир видел на экранах телевизоров первые шаги американских космонавтов по поверхности Луны.

Радиоспектроскопия помогает проникнуть в глубины микромира, а радиоастрономия доносит до нас таинственные голоса Вселенной.

По радио звучат сигналы бедствия — и люди приходят на помощь друг другу.

Радиофизические методы открыли новые возможности в метеорологии, радиолокации, в вождении кораблей и самолетов, в вычислительной технике, позволили создать точнейшие стандарты частоты и времени, привели к рождению квантовой радиофизики и голографии.

На одном из крупнейших в мире Серпуховском ускорителе элементарных частиц заряженные частицы разгоняются до громадных скоростей с помощью генераторов СВЧ.

Возможно, что именно СВЧ колебания помогут нагреть плазму до термоядерных температур и решить проблему управляемого термоядерного синтеза, и тогда человечество получит неисчерпаемый источник энергии.

Радио открывает человечеству новые пути в будущее.

Свет

Все живое на Земле существует только благодаря лучистой энергии солнечного света. Если бы на нашей планете не было атмосферы, которая отражает и поглощает и лишь частично пропускает энергию Солнца, поверхность земного шара там, где солнечные лучи падают на нее отвесно, получала бы за минуту 8,37 Дж на 1 см^2. Эта величина называется *солнечной постоянной*.

Зная размеры Земли, можно подсчитать, что за одну секунду свет приносит на нашу планету энергию, которая выделилась бы при сгорании 40 млн. т каменного угля.

Благодаря солнечной энергии на Земле возникла жизнь. Костер первобытного человека, уголь, сгорающий в домнах, топливо космической ракеты — все это световая энергия, запасенная когда-то растениями и животными. Остановись на месяц солнечный поток излучения, и на Землю выпадут дожди из жидкого азота и кислорода. Температура станет почти равной абсолютному нулю. Земля покроется семиметровым ледяным панцирем из замерзших атмосферных газов. Только иногда на этой ледяной поверхности будут встречаться лужицы жидкого гелия.

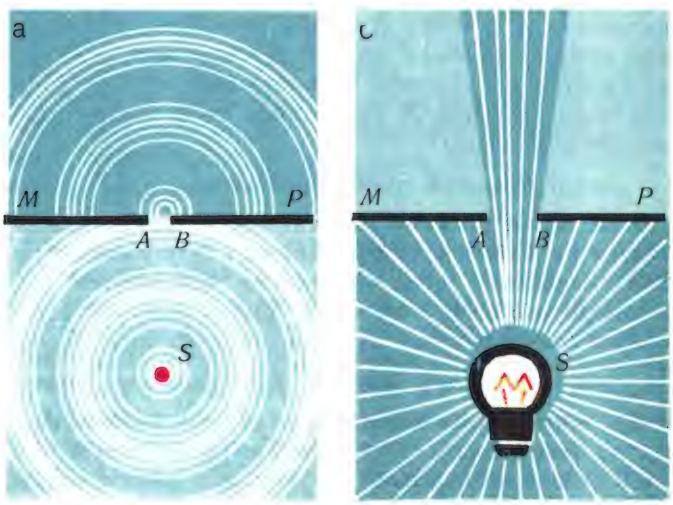
Что мы понимаем под словом «свет»

Если быть точным, то нужно сказать, что светом называют электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом. Длины волн этого излучения заключены в интервале от 0,38 до 0,77 мкм. Но часто физики называют светом и невидимые электромагнитные волны, длины которых лежат за пределами этого интервала: от 0,01 мкм до 340 мкм. Академик С. И. Вавилов в книге «Глаз и Солнце» писал: «Существует бесконечное разнообразие явлений, которые нам придется назвать световыми и которые невидимы».

Физические свойства электромагнитных волн близки к свойствам световых волн, хотя наш глаз и не чувствует их.

Рис. 1а. Камень упал в воду в точке S. Эта точка стала источником волн. Если на пути волн поставить преграду MP с узкой щелью AB, то от щели волны будут расходиться во все стороны.

Рис. 1б. Световой луч пойдет прямолинейно, если S — источник света, а размер щели, скажем, 0,5 см.



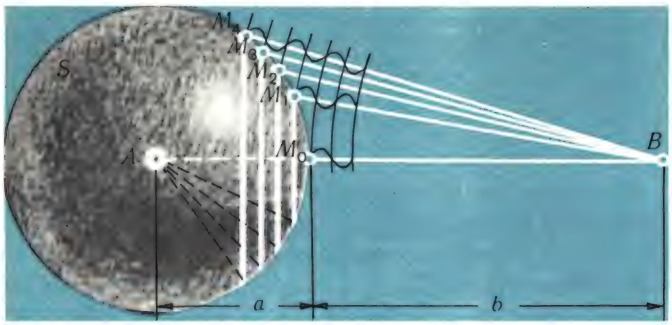


Рис. 2.

Луч и волна

Если в воду упал камень, то волны от него расходятся во все стороны даже после щели, установленной на их пути (рис. 1 а). Световой луч распространяется через большое отверстие прямолинейно (рис. 1 б). Казалось бы, это противоречит волновой природе света. Представление о свете как о волнах было признано только после работ Х. Гюйгенса и О. Френеля. В 1818 г. на одном из заседаний Парижской академии наук рассматривался мемуар Френеля (так назывались доклады, представляемые в академию). В докладе была изложена теория, объяснявшая прямолинейное распространение света. При этом свет рассматривался как поток волн.

Если в точке A (рис. 2), центре сферы S, поместить точечный источник света, рассуждал Френель, то световые волны от него будут одновременно доходить до поверхности S. Из каждой точки этой сферы в точку B приходят световые волны и складываются там по законам сложения волн. Мы как бы забыли о существовании источника A и считаем теперь источником световых волн сферу S. Чтобы вычислить общее действие волн, Френель разбил поверхность на кольцевые зоны. Центр зон лежал в точке пересечения поверхности S и луча света AB, идущего из источника A в точку B. Чтобы упростить нахождение суммы, Френель выбрал ширину зон так, что расстояния от внешней и внутренней границ каждой зоны до точки B отличались на половину длины световой волны:

$$M_1B - M_0B = M_2B - M_1B = \ldots = \frac{\lambda}{2}$$

При таком делении на зоны их площадь оказывается одинаковой. А это означает, что каждая такая кольцевая зона испускает одинаковое количество световой энергии. С другой стороны, свет второй зоны проходит путь до точки B, больший на $\frac{\lambda}{2}$, чем свет первой зоны, и, следовательно, приходит в точку B с запозданием на половину длины волны по отношению к свету первой зоны. Свет четвертой зоны также запаздывает на половину длины волны по отношению к свету третьей зоны. Обозначим световые потоки от нулевой и последующих кольцевых зон как H_0, H_1,H_2... Так как H_1, H_3, H_5 отстают на половину длины волны от потоков предшествующих зон H_0, H_2, H_4, то по правилам сложения колебаний их нужно взять со знаком «минус» при сложении всех волн в точке B. Тогда получим: $H_0 - H_1 + H_2 - H_3 + H_4 - \ldots = H_0 - (H_1 - H_2) - (H_3 - H_4) - \ldots = H_0$. Так что действие световой волны точечного источника A в точке B определяется только нулевой зоной H_0. Площадь же нулевой зоны, как и остальных, равна $\frac{ab}{a+b} \cdot \lambda$, и для волны зеленого света, длина которой 0,5 мкм, площадь равна 0,0005 см^2, если $a = b = 20$ см. Эта площадь и равна площади сечения канала, по которому свет идет от A к B. Так Френель показал, что свет хотя и волна, но распространяется по узкому прямолинейному каналу. *Закон прямолинейного распространения света*, известный еще за две тысячи лет до Френеля, был обоснован с позиций волновой теории света.

Присутствовавший на заседании академии французский математик С. Пуассон, выслушав Френеля, сразу же указал на любопытное обстоятельство, следовавшее из его рассуждений: если перед точечным источником света поставить маленький непрозрачный кружок с ровными краями, то в центре тени должно было бы появиться светлое пятно. По мнению Пуассона, это противоречило здравому смыслу. Тотчас перед членами академии был поставлен опыт. В центре теневого круга появилось светлое пятнышко! Свет обогнул препятствие! С этого момента надолго восторжествовала *волновая теория*.

Самая большая скорость

Еще в далекие времена люди пытались измерить скорость звука и света. Если скорость звука удалось измерить сравнительно просто, то со скоростью света дело обстояло иначе. Только в 1675 г. датский астроном О. Рёмер, наблюдая затмение спутников Юпитера, вычислил скорость света в пустом пространстве — *вакууме*. Трудности измерения скорости света связаны с очень большой ее величиной. За миллионную долю секунды свет проходит 300 м. За 8 мин пробегает расстояние от Солнца до Земли, а ведь это 150 млн. км! По современным измерениям эта скорость равна 299 792 км/с. Оказалось, что скорость света обладает удивительным свойст-

Рис. 3.

вом — она не зависит от скорости источника. Такой вывод был сделан из опытов А. Майкельсона. Что же означает независимость скорости от движения источника? Пусть на корабле, который стоит на якоре, по цели стреляет носовая пушка и при этом скорость снаряда равна $v_с$ (рис. 3). Затем корабль двинулся к цели со скоростью $v_к$. Новый выстрел. Теперь снаряд летит к цели со скоростью $v_с + v_к$. Выпущенный в это же самое время снаряд из пушки, установленной на корме, будет двигаться со скоростью $v_с - v_к$. Иными словами, при стрельбе по направлению хода скорость корабля прибавляется к скорости снаряда, а при стрельбе в противоположном направлении — вычитается. Если же вместо пушек на корабле будет установлена лампа, то свет ее вспышки дойдет до равностоящих от корабля пунктов A и B одновременно, с какой бы скоростью ни шел корабль.

Почему свет не подчиняется простому правилу сложения скоростей? Эту загадку разъяснил великий физик Альберт Эйнштейн. В основе его теории относительности лежит факт, полученный опытным путем: независимость скорости света от скорости источника. Одно из главных положений теории относительности заключено в том, что в природе не существует скорости, большей скорости света в вакууме. Это самая большая, или предельная, скорость.

Другое важнейшее следствие теории относительности — связь между массой и энергией. Эйнштейн установил, исходя из основных положений теории относительности, что энергия содержится в скрытой форме в любом веществе, причем в массе m заключена энергия E, равная произведению массы на квадрат скорости света: $E = mc^2$. Эта формула помогает понять многие физические процессы.

Окно в мир

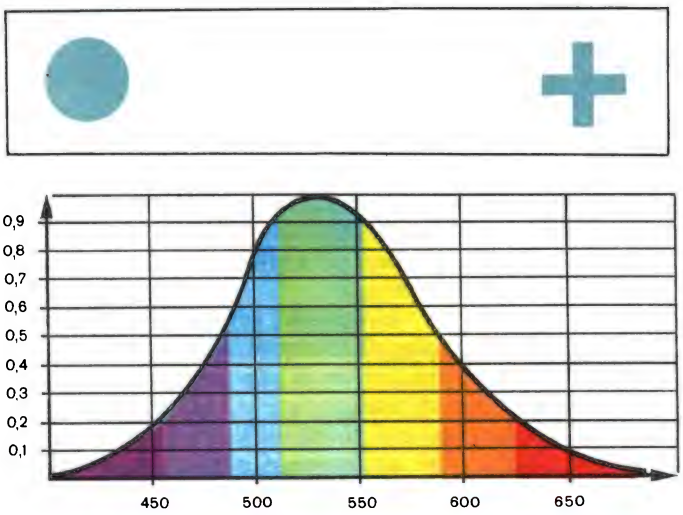
Свет не только создал все живое. Благодаря щедрости светового потока мы воспринимаем красоту окружающей нас природы, видим далекие галактики — огромные скопления звезд — и мельчайшие бактерии, измеряем высокие температуры и большие расстояния. И во всем этом в конечном итоге главную роль играет человеческий глаз. Поэтому не мудрено, что люди всегда интересовались устройством человеческого глаза.

Еще в 1604 г. немецкий астроном И. Кеплер сравнил глаз с камерой, дающей изображение на вогнутой поверхности сетчатой оболочки глаза. Р. Декарт, французский математик и философ, относившийся к следующему поколению ученых, проверил это предположение на опыте. Он взял на бойне бычий глаз и вставил его в отверстие в закрытых оконных ставнях. Предварительно радужная оболочка глаза была обработана так, что стала прозрачной. На ней Декарт мог видеть перевернутое изображение части улицы перед своим домом. В наше время оптическую систему глаза часто сравнивают с фотоаппаратом, и не без оснований. Объектив фотоаппарата передает изображение на фотопластинку, а оптика глаза — на глазную сетчатку — светочувствительный слой, передающий изображение в мозг. Перемещая объектив фотоаппарата вдоль оптической оси, можно получить на фотопластинке четкие изображения предметов, поэтому объектив, как правило, подвижен. Хрусталик — главная линза — может изменять кривизну своей поверхности с помощью особых мышц. Поэтому, оставаясь неподвижным относительно сетчатки, хрусталик четко изображает на ней по-разному удаленные предметы.

В фотоаппарате диафрагма ограничивает пучок света, входящий в объектив. В глазе ту же роль играет зрачок. В зависимости от светового потока, падающего на поверхность глаза, зрачок уменьшает или увеличивает свое отверстие помимо нашей воли. Этим глаз защищается от излишней световой энергии и, наоборот, увеличивает свою чувствительность, когда света недостаточно. Если перевести взгляд с темного на яркий предмет, то зрачки сужаются, уменьшается диаметр отверстия в радужной оболочке, в глаз попадает меньшая доля светового потока. Излишняя световая энергия не разрушает светочувствительного слоя. Светочувствительный слой сетчатки состоит из элементов двух видов: колбочек и палочек. Световое раздражение от каждой из них передается в мозг по нервному волокну. В сетчатке человеческого глаза 125 млн. палочек и 6 млн. колбочек! Только одно место на сетчатке нечувствительно к свету — слепое пятно. В месте, где оно

Рис. 4.

Рис. 5.



расположено, в глаз входит зрительный нерв. В нем, как в жгуте, собраны все нервные волокна от каждой палочки и колбочки. Слепое пятно позволяет поставить простой и интересный опыт. Посмотрите левым глазом на крест (рис. 4), а правый закройте. Боковым зрением вы увидите синий кружок слева. Если приближать рисунок к глазу, то на расстоянии 20—25 см синий кружок исчезнет из поля зрения — его изображение попадает на слепое пятно. Чувствительность человеческого глаза к видимому свету очень высока. Если человек долго находится в темноте, то глаз приспосабливается к восприятию чрезвычайно малых световых потоков. Такое увеличение чувствительности глаза называют *темновой адаптацией*. В опытах академика С. И. Вавилова было показано, что человек, глаза которого полностью привыкли к темноте, может чувствовать даже отдельные фотоны.

Глаз может воспринимать и большие световые потоки. Эти потоки могут превосходить наименьший световой поток, который глаз еще чувствует, в 1000 млрд., или в 10^{12}, раз. По широте охватываемого диапазона глаз можно сравнить с весами, на которых определяется масса тел от 0,1 мг до 100 т: бациллы и железнодорожного вагона!

Наш орган зрения хорошо различает цвета, т. е. по-разному воспринимает излучение в зависимости от его длины волны.

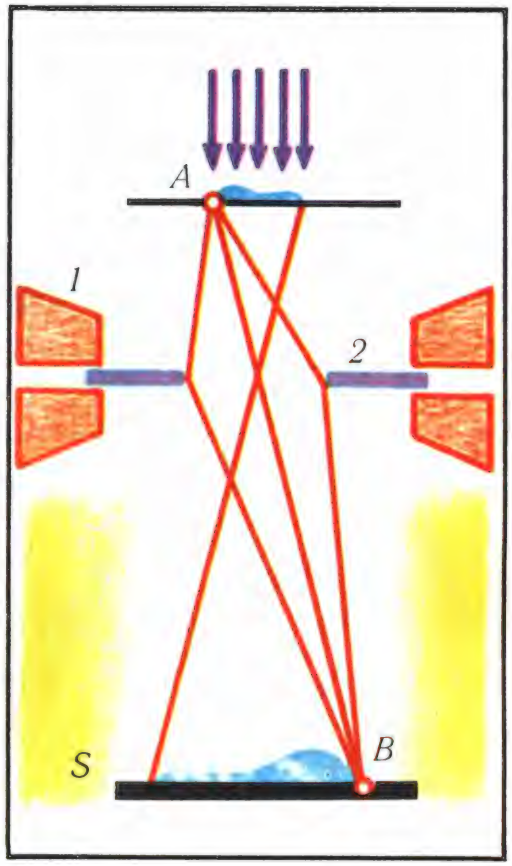
При одной и той же плотности светового потока желто-зеленые лучи будут восприниматься глазом как самые яркие, а красные и фиолетовые покажутся самыми слабыми: если яркость желто-зеленого света с длиной волны $\lambda = 0{,}555$ мкм принять за единицу, то яркость голубого света той же мощности будет равна 0,2, а яркость красного света — 0,1 от яркости желто-зеленого потока. Даже мощные потоки излучений с длиной волны короче 0,3 мкм и длиннее 0,9 мкм глаз не чувствует. Построим зависимость чувствительности глаза от длины волны падающего на него света. Отложим по оси ординат чувствительность глаза в относительных единицах, а по оси абсцисс — длину волны в нанометрах. Получим кривую спектральной чувствительности глаза (рис. 5). Ее называют *кривой относительной видности*. Максимум этой кривой, а значит и максимум чувствительности глаза, совпадает с максимумом излучательной способности Солнца. Наши органы зрения приспособлены именно к солнечному свету. Однако механизм зрения слишком сложен, и пока что нет полностью удовлетворительного объяснения, почему желтые лучи кажутся глазу много ярче, чем красные и фиолетовые. Сложность заключается в том, что в зрительном восприятии участвует головной мозг. Мозг накапливает жизненные картины и оставляет их в своих клетках, поэтому часто прошлые впечатления влияют на восприятие настоящего. Ведь мы можем «видеть» во сне или просто с закрытыми глазами, мысленно представлять те или иные картины.

Микроскопы

Изображение предмета на сетчатке глаза зависит от того, под каким углом мы видим предмет. Если на закопченное стекло вы положите двухкопеечную монету и, отставив его сантиметров на 20 от глаза, посмотрите на Солнце, то, двигая по стеклу монету, вы легко закроете наше светило так, что в глаз его свет совершенно не попадет. Диаметр Солнца равен 1 млн. 391 тыс. км, но оно удалено от Земли на 150 млн. км и его изображение на сетчатке примерно в 10 раз меньше, чем изображение монеты, отстоящей от глаза на 20 см. Это объясняется тем, что Солнце мы видим под углом 32′, а монету под углом 5°. Угол, под которым мы видим предмет, образуют лучи, идущие от контуров предмета к зрачку. Этот угол называют *угловым диаметром предмета*. Так, угловой диаметр Солнца равен 32′. Угловым диаметром и определяется видимый глазом размер предмета. Если две точки находятся на таком расстоянии от глаза, что они видны под углом меньшим 1′, то они сливаются на сетчатой оболочке. Это означает, что разрешающая способность глаза не превышает одной угловой минуты. Хрусталик не мо-

Рис. 6. Оптический микроскоп.

Рис. 7. Электронный микроскоп и оптическая схема электронного микроскопа.



жет отчетливо изобразить предмет на сетчатке, если этот предмет находится на расстоянии меньше 10 см. Для этого недостаточна максимальная кривизна хрусталика, создаваемая мышцами глаза. Поэтому очень малые предметы приходится рассматривать в микроскоп (рис. 6). Прибор увеличивает угол, под которым виден предмет. Увеличение оптических микроскопов в наши дни превосходит 2000. Ну а если за одним микроскопом, увеличивающим в 2000 раз, поставить другой, такой же силы, то увеличение уже будет 2000×2000 — в 4 млн. раз! Однако при таком увеличении мы не увидим никаких новых подробностей. Наоборот, изображение предмета будет размазано. Посмотрите в лупу на фотографию, напечатанную в газете. Если лупа сильна, то вы все равно не увидите новых деталей, а изображение потеряет свою четкость. Большое увеличение не помогает. Так же и в микроскопе: излишнее увеличение не поможет рассмотреть предмет, размеры которого меньше длины световой волны. Такие предметы свет огибает по законам дифракции.

Размеры предметов, еще различимых с помощью микроскопа, должны быть не меньше длины световой волны его осветителя. Минимальные размеры предмета, различимого в оптический микроскоп, определяются формулой $d = \frac{0{,}61\lambda}{A}$. Постоянная A в этой формуле приблизительно равна единице. Для зеленого света величина d равна 0,3 мкм. Чтобы видеть такой предмет под углом зрения большим 1′, достаточно его увеличить в 1000 раз. Можно освещать микроскопический предмет более коротковолновым ультрафиолетовым излучением, а потом с помощью особых светящихся экранов переводить его в видимый. Однако на этом много не выиграешь. Дело в том, что нет материалов, из которых можно сделать линзы коротковолнового микроскопа. Все вещества непрозрачны для коротковолновых ультрафиолетовых лучей. Лучшие материалы — кварц и флюорит. Но и кварц непрозрачен для излучений с длинами волн короче 0,18 мкм, а рекордсмен флюорит прозрачен до 0,12 мкм. Эта длина волны только в три раза меньше граничной волны видимого излучения. Конечно, можно создать зеркальный микроскоп для коротких длин волн, но такой микроскоп сложнее микроскопа с линзами, и, кроме того,

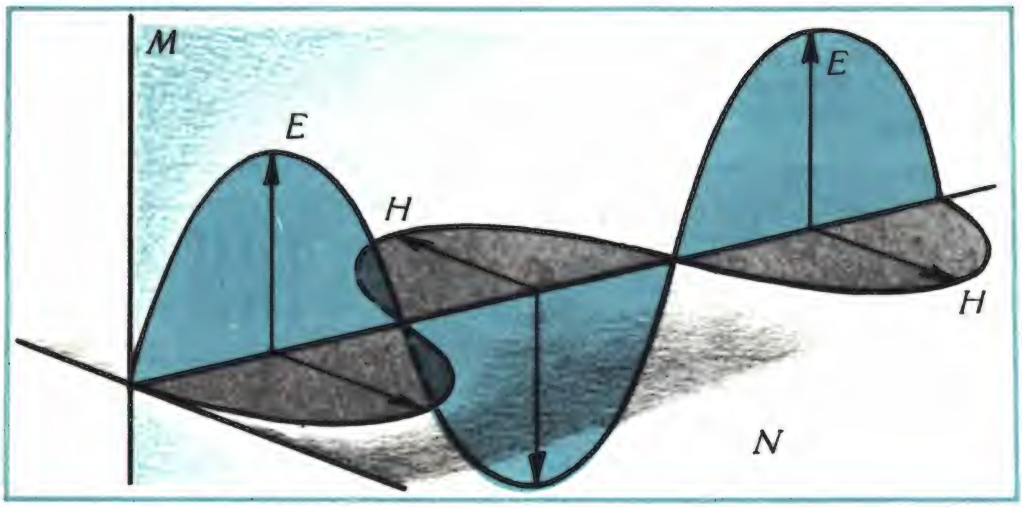


Рис. 8.

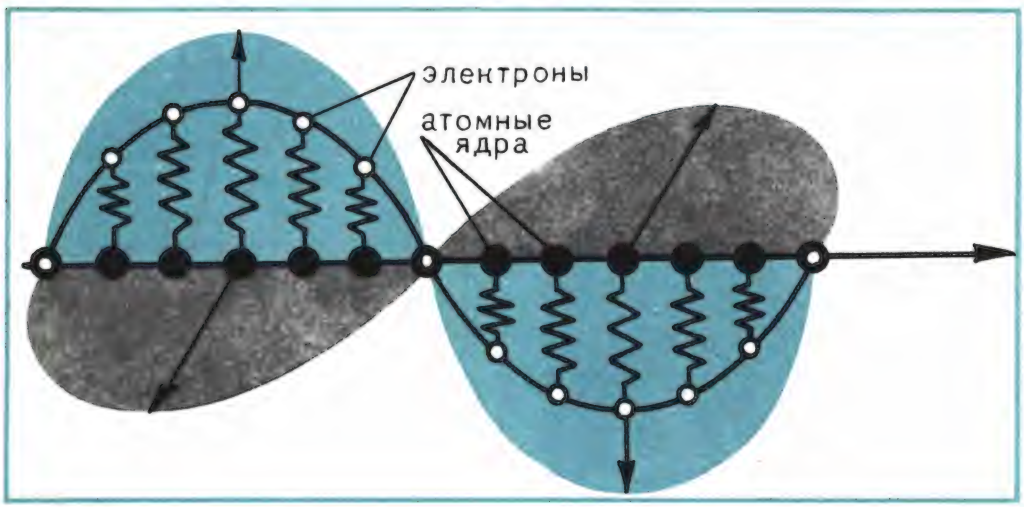


Рис. 9.

коротковолновое ультрафиолетовое излучение разрушает рассматриваемые предметы, особенно органические вещества. Изображение предмета можно получить не только с помощью световых лучей, но и при помощи пучков заряженных частиц, например электронов.

В лабораторию биолога принесли препарат, содержащий вирусы. В оптический микроскоп эти микроскопические тела невидимы, поэтому используют сложный электронный микроскоп. На очень тонкую коллодиевую пленку толщиной всего 0,01 мкм наносят каплю воды с вирусами, и затем пленка высушивается и закладывается на предметный столик электронного микроскопа. Из специального источника на нее падает параллельный пучок электронов (рис. 7). Разные части вируса рассеивают электроны по-разному, так как тело его неоднородно. Плотные части вируса рассеивают электроны сильнее, поэтому от этих частей меньшая доля проходит через отверстие *(2)* — апертурную диафрагму микроскопа. Электронная линза *(1)* собирает в точке B электроны, вышедшие из вируса в точке A расходящимся пучком, и так, точку за точкой, линза дает изображение предмета на светящемся под действием электронов экране S. В местах изображения, которые соответствуют более плотным, а значит сильнее рассеивающим электроны, частям вируса, будет наименьшая плотность электронного тока. На экране эти места окажутся темными, а менее плотные части, слабо рассеивающие электроны, окажутся светлее.

Мы рассмотрели только главную часть электронного микроскопа. На самом деле в нем после первой линзы нет никакого экрана, а полученное в плоскости S изображение служит, как и в оптическом микроскопе, объектом для второй линзы, которая и дает изображение на экране, светящемся под действием электронов. Это изображение экспериментатор рассматривает в лупу. Электронный микроскоп позволяет различить гораздо более мелкие детали, чем оптический,— у него колоссальная разрешающая способность.

В 20-х годах XX в. французский ученый Л. де Бройль высказал смелую мысль: связь между длиной световой волны фотона и его количеством

движения $\lambda = \frac{h}{p}$ справедлива и для частиц, обладающих массой покоя. Опытным путем это положение было подтверждено. Движущийся со скоростью v электрон действительно ведет себя как волна, длина которой $\lambda = \frac{h}{mv}$, где h — постоянная Планка, m — масса электрона. Обычно электроны в микроскопах разгоняются напряжением порядка 15 000 В. После этого их скорость достигает 72 000 км/с, а длина волны 0,01 нм. Получается, что длина волны таких электронов в 50 000 раз короче световой волны зеленого света. Поэтому и дифракция в электронном микроскопе сказывается мало. Наименьшие размеры предметов, которые можно различать в электронном микроскопе, очень малы — несколько десятых нанометра (несколько ангстремов). Это в сотни раз меньше того, что дает оптический микроскоп. Разрешаемые размеры в электронном микроскопе ограничиваются не дифракцией, а несовершенством электронных линз.

Телескопы

Первый телескоп, вернее зрительную трубу, изобрел датский оптик И. Липперсгей. Его изобретение, как имеющее военное значение, было засекречено датским правительством. Но весть о приборе, приближающем далекие предметы, широко распространилась по Европе. Узнал о ней и великий итальянский ученый Г. Галилей. Независимо от датского оптика ему удалось построить телескоп еще более совершенной конструкции. Галилей сразу же направил телескоп на небо. Там он увидел солнечные пятна, открыл спутники Юпитера. Венера, как оказалось, подобно Луне, проходила все фазы от узенького серпика до полного круга. Галилей различил также отдельные звезды Млечного Пути!

У телескопа, если его сравнить с микроскопом, совсем другая задача. Этот прибор дает возможность рассматривать далекие предметы под большим углом зрения. Если диаметр объектива или зеркала телескопа равен d мм, то с его помощью можно различать предметы с угловыми размерами $\frac{140''}{d}$. Следовательно, чем больше диаметр телескопа, тем больше его разрешающая способность. Существуют гигантские телескопы с диаметром зеркала более 5 м.

Вещество и свет

Быстрее всего свет движется в пустом пространстве. А как свет распространяется в прозрачных веществах: воде, кварце, в обычном стекле?

Это не простой вопрос. Только поняв природу света, ученые смогли установить законы распространения световых волн в веществе во всей их полноте. И первый значительный шаг сделал английский ученый Д. Максвелл. Он вывел систему уравнений, описывающих поведение колеблющихся электрических и магнитных полей. И вот оказалось, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света и не зависит от длины волны, если волны распространяются в вакууме. Максвелл пришел к заключению, что свет — электромагнитные колебания. В дальнейшем многими опытами этот вывод был подтвержден. На рисунке 8 показана структура светового луча. В плоскости M колеблется электрическое поле E, а в перпендикулярной плоскости N колеблется магнитное поле H.

Если внимательно посмотреть на рисунок, то станет ясно, что частота колебаний ν равна скорости света, деленной на длину волны: $\nu = \frac{c}{\lambda}$. За одну секунду электрическое и магнитное поля в зеленом световом луче совершают 600 биллионов колебаний.

Когда световой пучок входит в прозрачное вещество, его электрическое поле, меняющееся очень быстро, не успевает раскачать тяжелые атомные ядра и связанные с ними большими силами электроны внутренних атомных оболочек. Так невозможно раскачать маятник, бросая в него маковые зерна. Зато внешние электроны, слабо удерживаемые ядрами, смещаются под действием электрического поля световой волны, повторяя ее «рисунок» (рис. 9).

Электроны здесь ведут себя так, будто они прикреплены к атомным ядрам на пружинках. Смещенные световым электрическим полем, электроны начинают колебаться и испускать свет той же длины волны и того же направления, что и падающее излучение. Первичная волна и волна, рожденная колебаниями электронов, складываются. Скорость этой результирующей волны оказывается меньше, чем скорость падающей первичной волны. Этим и объясняется замедление света в веществе, несмотря на то что между отдельными атомами свет идет с обычной скоростью c.

Физики вычислили, что отношение скорости света в вакууме c к его скорости распространения в про-

Рис. 10.

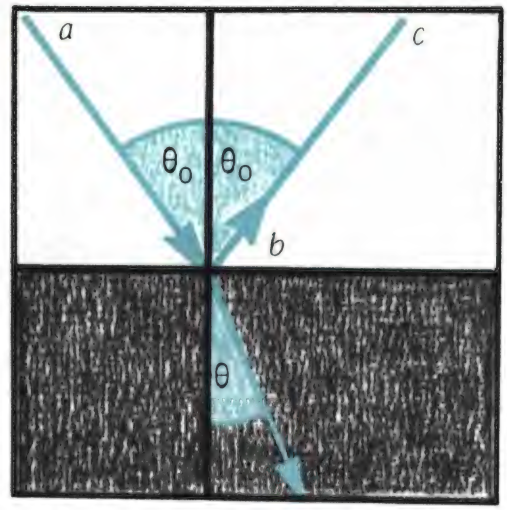


Рис. 11. Θ_0 — угол падения (отражения); Θ — угол преломления; *ab* — падающий луч; *bc* — отраженный луч; *bd* — преломленный луч.

зрачном веществе v равно $1+\frac{A}{a^2-\nu^2}$. В этой формуле a и A — постоянные величины, характеризующие данное вещество, а ν — частота колебаний световых волн. Величина a для воздуха, стекла, кварца, флюорита и других прозрачных веществ больше частоты световых колебаний, и если вспомнить алгебру, то станет ясно, что отношение $\frac{c}{v}$ для световой волны больше единицы, а это означает, что свет в прозрачных веществах распространяется медленнее, чем в пустоте. Отношение $\frac{c}{v}$ обозначают буквой n и называют показателем преломления вещества:

$$n=1+\frac{A}{a^2-\nu^2}.$$

Посмотрите внимательно на эту формулу. Показатель преломления растет с увеличением частоты колебаний: чем больше ν, тем меньше $a^2-\nu^2$, а следовательно, больше величина n.

Почему же отношение скоростей $\frac{c}{v}$ назвали показателем преломления света? Разве можно сломать световой луч? Оказывается, можно. Опустим в стакан с водой ложку. На границе раздела между воздухом и водой ложка нам покажется сломанной (рис. 10). Конечно, когда мы достанем ложку из воды, на ней не будет никаких повреждений. Ведь преломлялись только световые лучи на границе воздуха и воды, и преломлялись именно потому, что скорость света в воде в 1,33 раза меньше, чем в воздухе. В общем случае для любой волны — звуковой и световой — справедлив закон: $\frac{\sin\Theta_0}{\sin\Theta}=n$ (рис. 11). При этом падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости.

Тайны стеклянной призмы

Вспомним теперь, что показатель преломления зависит от частоты колебаний световой волны. Поэтому если луч белого света, в котором «смешаны» лучи с разной частотой колебаний, пройдет через стеклянную призму, то световые волны с большей частотой колебаний сильнее отклонятся от своего первоначального пути.

Люди долгое время думали, что дневной белый свет самый простой. Ньютон доказал, что он состоит из цветных лучей. Пропустив солнечный свет через призму, он получил цветную полосу — *спектр* (рис. 12).

Спектр получали и до Ньютона. Но появление цветной полосы объясняли воздействием вещества призмы на белый свет, заставляющим менять его свою естественную белую окраску. Ньютон же доказал, что белый свет состоит из цветных лучей всегда, даже в отсутствие призмы. Выделив диафрагмой зеленый луч, Ньютон направил его на другую призму. Такой луч уже не разлагался на составляющие. Его Ньютон назвал *монохроматическим* (в переводе с греческого — одноцветный). В монохроматическом излучении световая волна колеблется с какой-то определенной частотой. Ньютон, чтобы окончательно доказать, что белый свет сложный, получил его смешением монохроматических лучей.

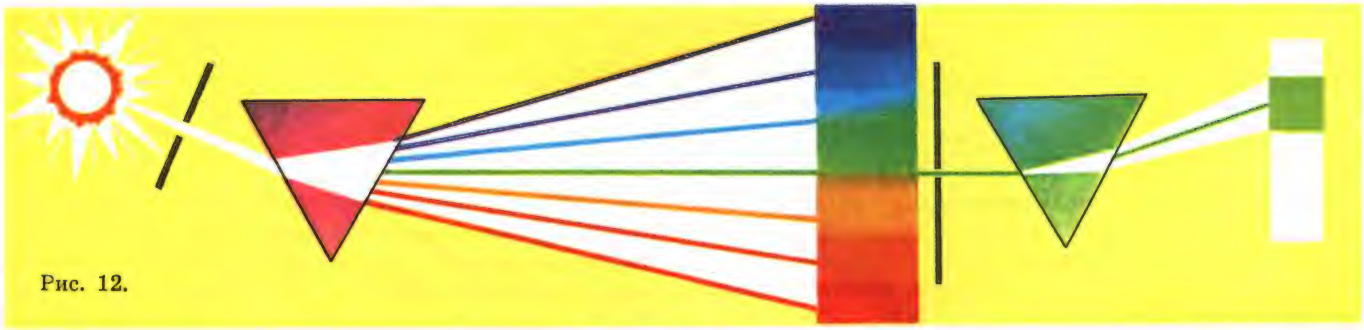
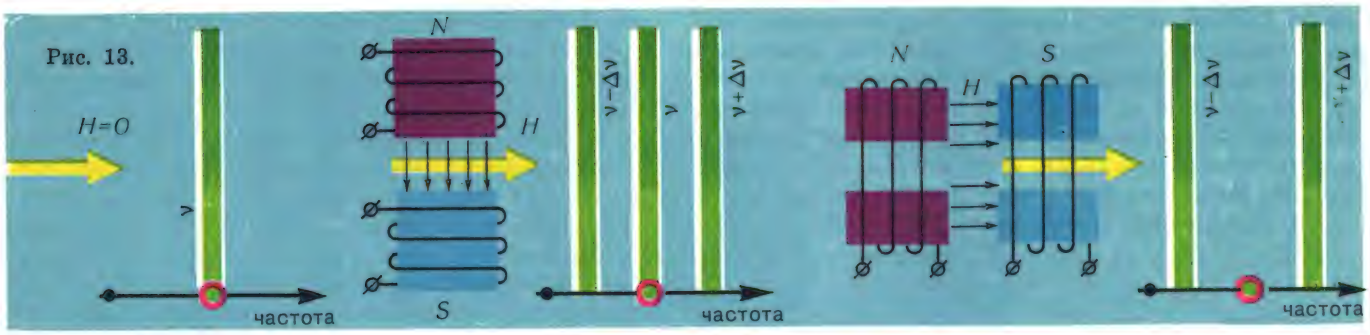


Рис. 12.



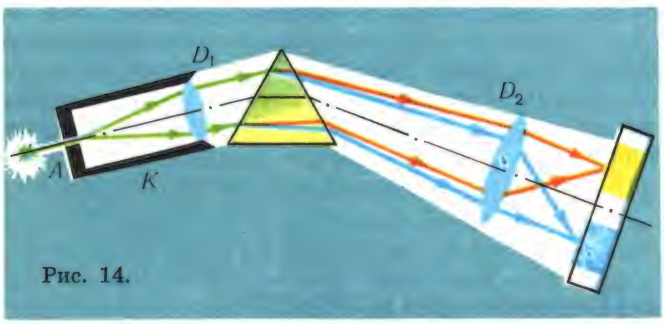


Рис. 14.

Однажды немецкий химик Р. Бунзен заметил, что в пламени изобретенной им очень жаркой горелки многие вещества превращаются в пар и окрашивают пламя в характерный для них цвет. Так, медь давала зеленое пламя, поваренная соль — желтое, а стронций — малиново-красное. Казалось, что, стоит только поместить в горелку вещество, и сразу же без утомительно долгих химических процедур по цвету пламени можно будет определить его состав. Однако задача оказалась не такой простой. Вскоре Бунзен убедился, что различные вещества могут давать пламя, которое нашему глазу кажется одинаковым по цвету. Он уже подумывал бросить свою затею, но неожиданный выход из положения подсказал ему профессор физики Г. Кирхгоф. По совету Кирхгофа свет окрашенного пламени горелки решено было пропустить через призму и наблюдать его спектр. Этот путь оказался плодотворным. Спектр каждого химического элемента отличался от спектров всех других. Например, отличить глазом, каким из двух элементов — литием или стронцием — окрашено пламя, невозможно: пламя всегда одного, малиново-красного, цвета. Если же свет «литиевого» пламени пропустить через призму, то получается яркая красная линия и рядом с ней слабая оранжевая. Стронций же дает голубую, две красных, оранжевую и желтую линии. Так был открыт *метод спектрального анализа* химических элементов. Ученые расшифровали язык света, и свет начал рассказывать им о составе испускающего излучение вещества.

В 1859 г. Бунзен и Кирхгоф открыли оптические методы анализа, а спустя почти десять лет, в 1868 г., французский астроном Ж. Жансен и английский астроном Н. Локьер независимо друг от друга с помощью спектрального анализа открыли на Солнце новый, неизвестный элемент — *гелий*. Открытие было сделано на расстоянии 150 млн. км от нашей планеты. Это было настоящим чудом. Лишь через 27 лет гелий был найден английским ученым У. Рамзаем в земном минерале клевеите.

Другие возможности спектроскопа не менее удивительны. С его помощью можно измерять скорость движения источников света. Оказывается, спектр источника света сдвигается в область длинных волн, если источник удаляется от наблюдателя, и в область коротких волн, если источник движется к наблюдателю *(эффект Доплера)*. По этому сдвигу нетрудно определить скорость излучателя. Таким именно путем ученые-астрономы измерили скорости удаляющихся от Солнечной системы галактик. Но не только скорость можно измерять спектроскопом. Еще в 1896 г. голландский ученый П. Зееман наблюдал влияние магнитного поля на спектры раскаленных газов. Оказалось, что в сильном магнитном поле у зелено-голубой линии кадмия появляются еще два спутника с частотами $\nu - \Delta\nu$ и $\nu + \Delta\nu$, если наблюдение вести поперек магнитного поля. В случае наблюдения вдоль магнитного поля вместо

линии с частотой ν появляются две линии с частотами $\nu + \Delta\nu$ и $\nu - \Delta\nu$. Поэтому по спектру вещества можно судить не только о величине, но и о направлении магнитного поля, в котором находится светящееся вещество (рис. 13).

Еще 300 лет назад Галилей наблюдал темные пятна на Солнце. И вот оказалось, что солнечные пятна — громадные магнитные острова. Это установил с помощью спектроскопа американский ученый Д. Хейл в 1908 г., спустя 12 лет после открытия Зеемана. Он направлял свет солнечного пятна в спектроскоп и убеждался, что спектр излучения солнечного пятна такой же, как и спектр раскаленных газов, помещенных в магнитное поле.

От призмы к прибору

Первый спектр был получен и исследован И. Ньютоном. Кирхгоф усовершенствовал метод Ньютона, а главное, вместе с Бунзеном применил его к изучению света раскаленных паров различных химических соединений. Главной деталью спектроскопа осталась призма, но были добавлены и другие узлы, позволившие значительно повысить чувствительность прибора.

Световой луч, падая на плоскую грань призмы под углом Θ, частично отражается от поверхности, а частично входит в призму и изменяет свое направление — преломляется — по законам, которые мы уже знаем. Предположим, что на призму падает луч, содержащий голубой и желтый монохроматические лучи. Человеческий глаз устроен так, что этот смешанный луч будет нам казаться зеленым. Зато спектроскоп легко обнаружит, что луч смешанный, а не зеленый. Призма в большей мере отклонит синий луч, чем желтый. Показатель преломления n для лучей синего цвета у обычного оптического стекла марки К8 равен 1,522, а для желтых лучей $n = 1{,}516$.

Оптическая схема спектроскопа показана на рисунке 14. Труба K называется *коллиматором*. Перед щелью A коллиматора устанавливают источник света, спектр которого изучают. Эта щель помещена в фокальной плоскости двояковыпуклой линзы D_1. Линза D_1 из выходящего из щели A света формирует параллельный пучок. После призмы этот пучок расщепляется на два параллельных пучка, между осями которых и оптической осью линзы D_2 образуются разные углы. Поэтому в фокальной плоскости линзы D_2 появляются две линии — желтого и голубого цвета — изображения щели A. Щель A обычно очень узка, и поэтому ее изображения в разных цветах называют *линиями спектра*. Почему же Ньютон разложил солнечный свет, не пользуясь дополнительными линзами? Линза D_1 ему была не нужна, потому что солнечный свет падает на землю почти параллельным пучком и его расходимость — около половины градуса. Кроме того, солнце очень яркий источник света. В таком случае не нужна и линза D_2. Можно поставить экран, на который проектируется спектр на далеком от линзы расстоянии. Другое дело, когда ученый пытается изучить спектр какого-либо химического соединения. В этом случае и расходимость светового потока велика, и яркость мала. Расходимость света у далеких звезд, правда, значительно меньше, чем у солнечного излучения, но зато свет звезды, как правило, очень слаб. С помощью спектроскопа в некоторых звездах был открыт технеций — 43-й элемент, не сохранившийся на Земле со времени образования элементов. До этого его получили искусственно в лабораториях и изучили его спектр. На основании существования технеция в звездах ученые пришли к выводу, что в далеких мирах еще идет процесс рождения элементов.

«Линии» химических элементов

Каким же путем можно обнаружить химический элемент с помощью спектроскопа?

Введем в почти бесцветное пламя бунзеновской горелки платиновую проволочку, смоченную раствором, содержащим поваренную соль. Поднесем при этом пламя горелки к щели A коллиматора спектроскопа. Тогда в окуляре появятся две очень близко расположенные желтые линии. Такие же линии будут видны, если в пламя горелки помещать другие соединения натрия, но они никогда не возникают, если в соединении натрия нет. Поэтому естественно прийти к выводу, что желтые линии принадлежат натрию.

Оказывается, светящиеся пары любого химического элемента излучают только одному ему присущий спектр — набор монохроматических излучений. Каждое монохроматическое излучение дает, как мы видели, в спектроскопе цветную линию. Такой состоящий из отдельных линий спектр называют *линейчатым*. В специальные таблицы собраны спектральные линии всех элементов, и в них указаны дли-

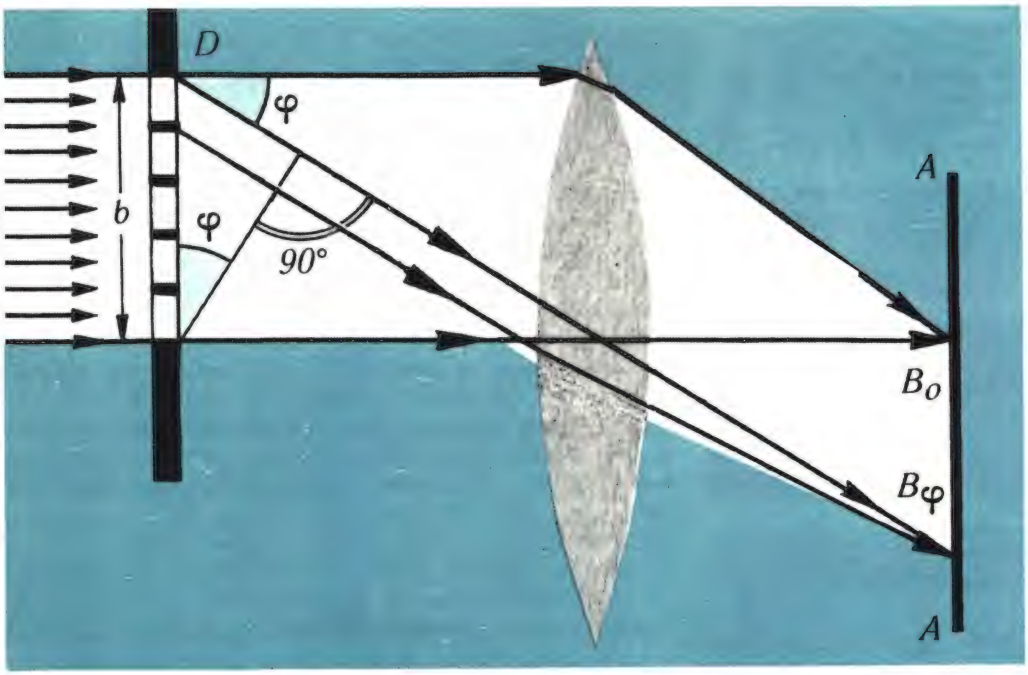


Рис. 15.

ны волн спектров элементов, последовательность и интенсивность спектральных линий. По таким таблицам можно быстро определить содержание даже микроколичеств данного элемента в химическом соединении. Если, например, вы подержали в руках платиновую проволочку, а затем поместили ее в пламя горелки перед щелью спектроскопа, то сразу же появятся линии натрия. Оказывается, следы поваренной соли, присутствующие на ваших руках, попали на проволочку, и этой незначительной массы вещества оказалось достаточно, чтобы обнаружить присутствие натрия. Натрий и калий обнаруживаются в неизвестном химическом соединении даже тогда, когда их содержание не превышает одной миллиардной доли.

Дифракционная решетка

Для изучения спектров в современных спектроскопах применяют дифракционную решетку. Бывают решетки с очень большим числом щелей. Эти щели образуются путем нанесения штрихов на стеклянные пластинки. Бывают и отражательные решетки, когда штрихи нанесены на зеркальную поверхность металла. Не редкость решетки, у которых на 1 мм нанесено более тысячи штрихов. Штрихи наносят с помощью специальных машин.

Места, где свет, рассеянный решеткой, собирается в максимумы, определяются формулой $d \sin\varphi = m\lambda$. В этой формуле m — целое число. Чем меньше расстояние d между соседними штрихами, тем больше разница между углами отклонений лучей света с разной длиной волны. Когда $m = 0$, угол отклонения луча с любой длиной волны одинаков и равен нулю. Поэтому в направлении $\varphi = 0$ получается белая полоса — смесь излучений с разными длинами волн. Зато начиная с $m = 1$ на экране появляются цветные полосы. Это *спектр первого порядка.*

Чтобы понять, как это получается, посмотрим вначале, что происходит со светом, падающим на щель D, размеры которой одного порядка с длиной световой волны (рис. 15). Разобьем мысленно щель на ряд полосок одинаковой площади. Если на щель падает параллельный пучок монохроматического света, то каждую полоску можно условно считать как бы независимым источником световых волн. Световые колебания такой полоски можно записать формулой: $S = a \cos 2\pi \frac{t}{T}$. Здесь T — период колебаний световой волны, a — амплитуда колебаний. Так как мы выбрали все полоски одинаковой площади, то их амплитуды также одинаковы. Линза, установленная за щелью, сводит всякий параллельный пучок света в одну точку. Положение этой точки определяется углом φ. Когда угол φ равен нулю, то все лучи приходят в точку B_0. В случае какого-то произвольного угла φ лучи придут в точку B_φ. В точке B_φ волны могут ослабляться или усиливаться. Так, когда $b \sin\varphi = \lambda$, свет в точке B_φ будет ослаблен. Значения же угла $\varphi = 0$; тогда $\frac{b\pi}{\lambda} \sin\varphi = 1{,}43\pi$; $\frac{b\pi}{\lambda} \sin\varphi = 2{,}46\pi$ соответствуют максимумам света. В местах экрана AA, соответствующих этим углам, лягут световые полосы. С увеличением φ яркость полос быстро убывает. Чередование темных и светлых

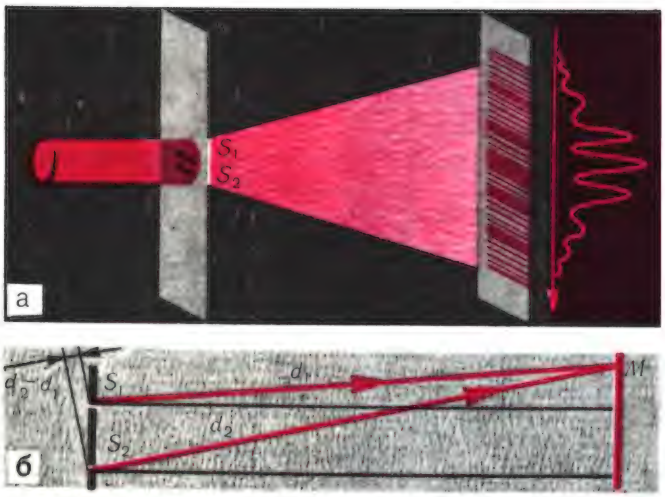


Рис. 16. Схема опыта для наблюдения интерференции: *а* — получение интерференционной картины от двух щелей S_1 и S_2; *б* — если разность хода лучей от щелей до точки *M* экрана d_2-d_1 составляет целое число полуволн $n\frac{\lambda}{2}$, то в точке *M* наблюдается максимум излучения.

полос на экране, помещенном в фокальной плоскости линзы, физики называют *дифракционной картиной*.

Если теперь перед источником света поставить экран с двумя щелями, то появится совсем новая дифракционная картина. Она вовсе не будет простым наложением двух дифракционных картин от каждой щели. В ней существенным образом скажется взаимодействие волн, распространяющихся из обеих щелей. Казалось бы, нельзя придумать прибора проще, чем две небольшие щелки, но такие щели помогли ученым решить многие важные проблемы.

Существуют решетки, с помощью которых можно измерить длину волны с точностью до шестого десятичного знака. Первая решетка была изготовлена И. Фраунгофером. Она послужила ему для изучения темных линий в солнечном спектре. Позднее эти линии были названы по имени их открывателя и исследователя *фраунгоферовыми*.

Как измерили длину световой волны

Еще со времен Ньютона, задолго до того, как было установлено, что свет — это электромагнитные колебания, ученые знали, что свет обладает волновыми свойствами. Но что именно колеблется в световой волне, стало ясно только после того, как появилась теория Максвелла. Тем не менее, даже не зная этого, физики создали стройную волновую теорию света и сумели измерить длину световой волны.

Волновое движение характеризуется длиной волны, частотой колебаний и скоростью распространения волны. Но свет лампы накаливания обусловлен колебаниями громадного числа электронов в атомах раскаленного тела. В таком случае «комплектом» атомов излучается непрерывный набор частот в широком интервале значений. Если светом лампы накаливания осветить две щели, то стоящий за ними экран будет освещен равномерно. Точнее, освещенность экрана будет просто суммой освещенностей от двух щелей. Все будет совсем по-другому, если на две щели S_1 и S_2, расположенные на расстоянии 50 мкм друг от друга, направить свет квантового генератора — лазера (рис. 16, *а, б*). На экране появится интерференционная картина. Это результат сложения гармонических световых колебаний лазера, прошедших через щели. *Гармоническими колебаниями* называют такие, которые можно записать с помощью функции синуса или косинуса.

От лампы же интерференционной картины не получилось потому, что волны, излучаемые нагретыми телами, хаотичны, или, как говорят, с переменной фазой. В таком случае интенсивности просто складываются.

Однако *интерференция* была изучена задолго до появления лазеров с помощью обычных источников света. Для этого французский физик Френель соорудил изящные оптические системы — *зеркала* и *бипризму*. С их помощью он получал систему отраженных волн, которые интерферировали между собой.

Интерференционные методы исследования света позволяют не только измерять длину световой волны, но и измерять с необычайной точностью размеры предметов.

Специальный прибор — *интерферометр*, принцип действия которого основан на законах сложения световых колебаний, дает возможность определить с высокой точностью длину волны оранжевой линии изотопа криптон-86 (см. ст. «Всему миру — одну меру»).

Красный гигант

Чем сильнее нагрето тело, тем больше оно излучает света. Но вот звезды красноватого цвета, такие, как звезда Бетельгейзе в созвездии Орион, по сравнению с другими звездами не отличались высокой температурой. Скорее наоборот, эти звезды были холодными. Они принадлежали к классу звезд, поверх-

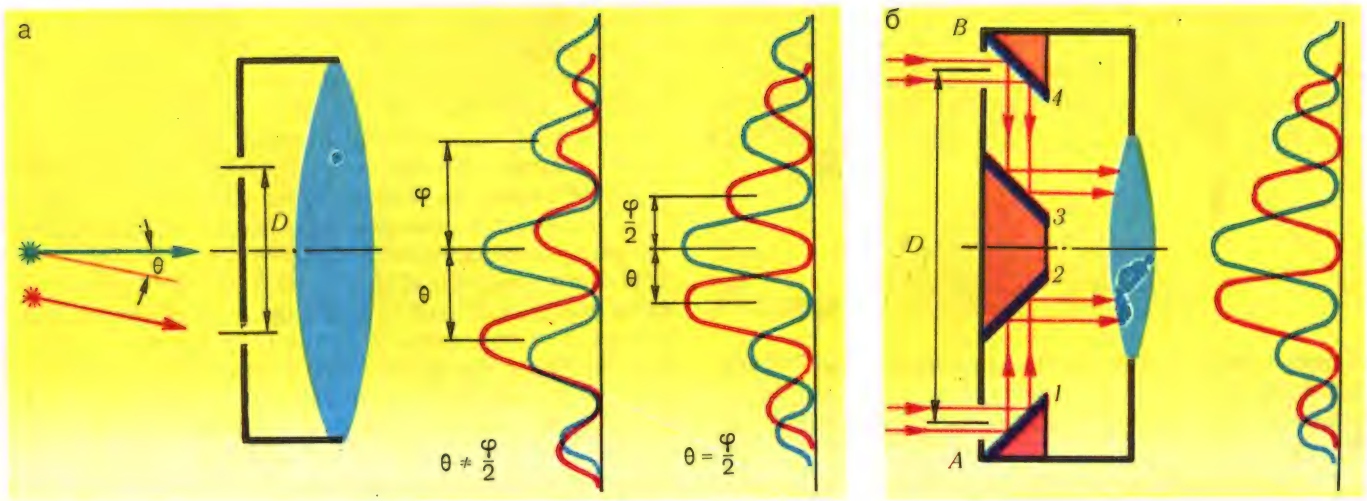


Рис. 17. Применение интерференции света для определения диаметров звезд: *а* — расположение щелей в опыте, предложенном Физо и осуществленном Стефаном. Расстояние D слишком мало; *б* — Майкельсон с помощью зеркал *1, 2, 3, 4* увеличил расстояние D между щелями. Благодаря увеличению D удалось достичь равенства $\Theta=\varphi/2$.

ность которых нагрета всего до 3000° С. А это значит, что поток излучения единицы поверхности такой звезды в 16 раз меньше, чем поток излучения единицы поверхности Солнца. И тем не менее они давали очень много света. Почему? Может быть, у них очень большие размеры? Расчеты показывали, что в этом случае такие звезды должны быть гигантами. Но так ли все обстоит на деле?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно было измерить диаметр этих звезд. Даже в самый сильный телескоп звезды кажутся точками, и определить их размеры не удается. И вот эту сложнейшую задачу американские ученые — физик А. Майкельсон и астроном Ф. Пиз — решили с помощью двух щелей.

Еще в середине XIX в. И. Физо предложил изящный метод, который, по его мнению, позволил бы измерить диаметр звезд. Идея Физо заключалась в следующем. Если перед линзой телескопа поставить две щели на расстоянии D, то в фокальной плоскости телескопа от удаленного источника света возникает интерференционная картина. Если теперь рассматривать через такой телескоп две очень близкие друг к другу звезды, то каждая из них образует свою систему интерференционных полос. Можно направить телескоп так, что свет от одной из звезд пойдет параллельно оптической оси телескопа. Тогда свет другой звезды будет составлять с оптической осью телескопа угол Θ. Этот угол и есть угловое расстояние между звездами.

Сдвиг дифракционных картин относительно друг друга определяется углом Θ (рис. 17, *а*). Центральный максимум и следующий за ним максимум дифракционной картины звезды сдвинуты на расстояние, определяемое углом $\varphi=\frac{\lambda}{D}$. Если расстояние D подобрать так, что угол φ будет равен 2Θ, то максимумы дифракционной картины от первой звезды совпадут с минимумами дифракционной картины от второй и освещенность в фокальной плоскости линзы будет почти равномерной — полосы размажутся, и это произойдет в тот момент, когда $\Theta=\varphi/2$. Таким образом, измерение угла Θ сведется к определению величины D, соответствующей моменту исчезновения дифракционных полос. Ведь когда дифракционная картина исчезает, $\Theta=\frac{\lambda}{2D}$.

Края звезды можно рассматривать как два источника света, находящиеся на угловом расстоянии, равном угловому диаметру звезды. Значит, таким способом можно определить угловой диаметр звезды, а умножив угловой диаметр на расстояние Земля — звезда, найти ее линейный диаметр.

Первая попытка осуществить предложенный Физо эксперимент принадлежит Стефану. Однако она оказалась безуспешной. Даже, когда щели отодвигались на самые края самого большого телескопа, доступного Стефану, интерференционные полосы не исчезали. Величина D оказывалась слишком малой, чтобы получить нужное значение Θ.

Прошло почти 50 лет, и Майкельсону пришла блестящая идея. На большой телескоп, диаметр линзы которого 2,5 м, он положил перекладину с зеркалами, расположенными так, как представлено на рисунке 17, *б*. Теперь эффективным расстоянием D стал отрезок AB, значительно больший диаметра линз телескопа. Эта система и была направлена на Бетельгейзе. Сначала были отчетливо видны интерференционные полосы, но, когда зеркала раздвинули, полосы исчезли. Полосы могли исчезнуть и в том случае, если бы во время передвижения зеркал одно

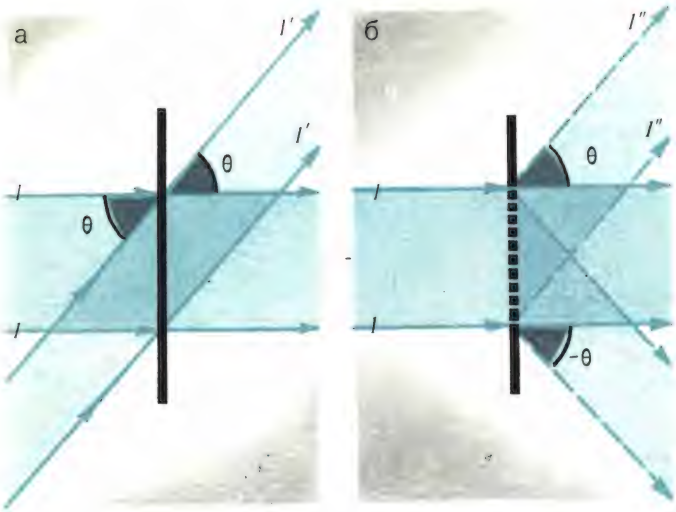


Рис. 18.

из них слегка повернулось на перекладине. Чтобы избежать ошибки, Майкельсон, когда исчезли интерференционные полосы, направил все устройство на другую звезду — полосы появились вновь. Система работала надежно. Это был фантастический успех. С помощью щелей и зеркал удалось определить угловой диаметр звезд. У Бетельгейзе линейный диаметр оказался равным 390 млн. км. Если бы эта звезда была на месте Солнца, то земная орбита проходила бы внутри звездного тела.

Мир голографии

Свет иногда рассматривают как поток фотонов, а иногда как волну, переносящую электромагнитные колебания. Все зависит от решаемой задачи. В одних случаях проявляются главным образом *волновые* свойства света, а в других — *корпускулярные*, когда свет нужно рассматривать как поток частиц — фотонов. Квантовая механика помогает физику установить, какие свойства света окажутся главными в том или ином явлении.

Если световые колебания можно представить гармоническими функциями, например синусоидальной функцией с неизменной фазой, то такие колебания называют *когерентными*. Когда речь идет о когерентном свете, то его следует рассматривать как электромагнитную волну. В когерентном луче напряженность магнитного и электрического полей меняется по синусоидальному закону без наложений и сбоев. Потоки когерентного излучения по-настоящему стали доступны только после изобретения лазера.

Осветим фотографическую пластинку двумя когерентными пучками света (рис. 18, *а*). Один из них (*1*) направим перпендикулярно к поверхности пластинки, а другой (*1'*) — под углом Θ. Тогда, складываясь, световые колебания дадут на пластинке систему интерференционных полос. После проявления пластинки она представит собой дифракционную решетку. Осветим эту решетку вновь перпендикулярным к ее поверхности пучком когерентного света (1). Часть энергии этого пучка пройдет через щели решетки, не изменив направления, и, кроме того, возникнут еще два параллельных пучка света, распространяющихся под углами Θ и $-\Theta$ к поверхности пластинки. Эти углы будут в точности такими же, как и угол, под которым освещалась пластинка, а интенсивность пучка (*1''*), идущего под углом Θ, будет такой же, как и падавшего ранее на пластинку. Иными словами, фотопластинка «запомнила», под каким углом и с какой интенсивностью на нее падал луч. Этот «старый» луч восстанавливается под действием перпендикулярного луча, который мы назовем *опорным* (рис. 18, *б*).

Возможность восстановления первичного светового пучка с помощью опорного луча приводит к далеко идущим последствиям. Оказывается, с помощью когерентного излучения на фотопластинку можно записать не только характеристики параллельного пучка света, но и свет, отраженный лепестками розы, мраморной колоннадой или хрустальной вазой. Записать, а потом восстановить свет, отраженный любым предметом.

Освещенный или светящийся предмет всегда можно представить как совокупность отдельных светящихся точек. Поэтому если научиться записывать на фотопластинке свет одной точки, то можно записать и свет, испускаемый самым сложным объектом. Свет от светящейся точки падает на фотопластинку конусом (рис. 19, *а*). Разобьем этот конусообразный пучок на очень узкие кольца, такие, что расходимостью лучей в них можно практически пренебречь. Это означает, что каждый узкий пучок мы можем считать как бы параллельным.

Фотопластинка на участке A_1B_1 запомнит пучок, падавший на нее под углом φ_1, на участке A_2B_2 — под углом φ_2, а вообще на участке A_iB_i — под углом φ_i (рис. 19, *б*). Чем больше угол φ, чем чаще дифракционные полосы, тем больше «штрихов» приходится на единицу длины пластинки. Если после такого освещения проявить пластинку и осветить ее опорным пучком когерентного излучения, то возникнет точно такой же световой поток, который падал на пластинку до ее проявления от точечного источника. Таким путем мы с вами решили задачу записи светового потока, отраженного малым участком предмета, который можно принять за точечный источник света. Отраженный всем предметом световой поток пластинка запомнит как сумму по-

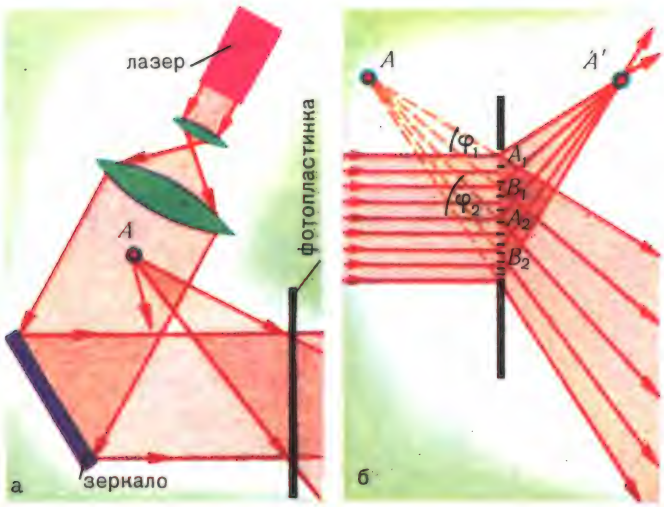


Рис. 19. Голографирование светящейся точки: *а* — получение голограммы точки A; *б* — восстановление изображения точки A по голограмме.

токов от малых частей предмета — отдельных точек, испускающих или отражающих свет.

Полосы на пластинке будут очень сложными и, конечно, совсем не будут напоминать сам предмет, так же как система правильных полос вовсе не похожа на параллельный пучок света. Такая запись изображения предмета называется *голограммой*. Свойства голограммы поистине чудесны. Освещая изображенные на фотопластинке полосы и кольца, образующие какие-то запутанные и непонятные фигуры, мы восстанавливаем когда-то отраженный предметом световой поток, и этот поток ничем не отличается от того, который падал на пластинку.

Допустим, фотопластинка с записанной на ней голограммой разбилась. И все же любой осколок этой пластинки, освещенной опорным светом, восстановит изображение. Это станет понятным, если посмотреть на рисунок. В самом деле, части A_1B_1 и A_2B_2 пластинки независимо создают изображение точки A. Правда, с уменьшением размеров голограмм качество изображения ухудшается.

Опорный световой пучок воссоздает объемное изображение предмета, и даже не такое, как мы видим на стереоснимках, когда создается иллюзия объемного изображения, но никаких новых подробностей не увидишь, рассматривая снимок под разными углами зрения, а такое, когда, двигаясь вдоль экрана, можно увидеть то, что прежде загораживали другие предметы.

Удивительные возможности открывает голография. Если снять фильм, где каждый кадр — голограмма, то получится объемная кинокартина необыкновенно высокого качества.

Пройдет не так уж много времени, и ученые и инженеры смогут создать установки, передающие голограммы на большое расстояние. Будет осуществлено объемное телевидение. Происходящее за многие тысячи километров событие можно будет перенести в зрительный зал.

Но не только кино и телевидение станут иными. Преобразятся и наши библиотеки. На одну пленку голограммы можно записать более ста страниц текста.

Мощным источником когерентного света, необходимым для голографии, является лазер. Поговорим теперь о его излучении.

Лазер

Слово *лазер* составлено из первых букв английского названия, которое в переводе на русский означает: усиление света с помощью вынужденного излучения. В советской научной литературе вместо слова «лазер» часто встречается обозначение ОКГ *(оптический квантовый генератор)*.

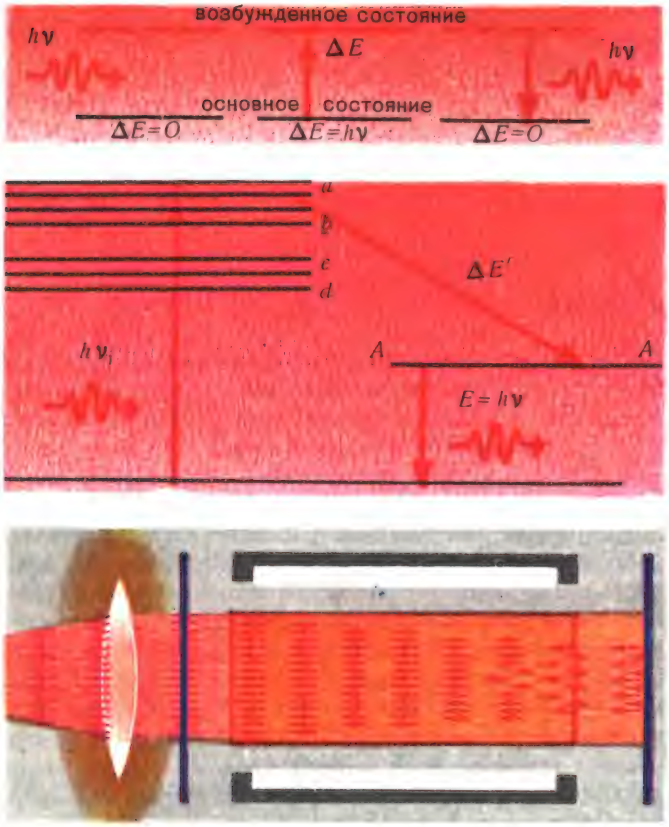
Попробуем понять, как работает этот удивительный источник света. Остановимся вначале на процессах излучения и поглощения света атомами вещества. Атомы поглощают световую энергию только определенными порциями — *квантами*. Когда атом поглощает световой квант — *фотон*, его внутренняя энергия увеличивается. Принято говорить, что при этом атом переходит на более высокий энергетический уровень. Этот новый уровень лежит выше «старого» на величину энергии поглощенного кванта. Обычно атом стремится перейти в состояние с наименьшей возможной для него энергией. Такое состояние называют *основным*.

Допустим, что атом получил избыток энергии. Атом, у которого запас энергии больше, чем в основном состоянии, называют *возбужденным*. Обычно он очень быстро — за одну десятимиллионную долю секунды — избавляется от лишней энергии и переходит в основное состояние. При этом атом испускает фотон, энергия которого $h\nu$ (рис. 20). В большинстве случаев излишнюю энергию атом отдает без всякого воздействия. Такое излучение называют самопроизвольным или *спонтанным*. Однако процесс перехода атома с высокого энергетического уровня на более низкий может происходить и под действием другого кванта (см. ст. «Волны и кванты»). Пролетая мимо возбужденного атома, фотон может увлечь за собой фотон такой же энергии, как и его собственная, если энергия возбуждения атома равна энергии пролетающего фотона. Замечательно, что электромагнитные колебания похищенного фотона будут в той же фазе, что и у фотона-«похитителя». Таким образом, проходящий световой поток стремится перевести атомы на более низкие уровни.

Рис. 20 *(вверху)*.

Рис. 21 *(в середине)*. Схема энергетических уровней розового рубина.

Рис. 22 *(внизу)*. Возникновение лавины фотонов в лазере.



Еще до изобретения лазера физики наблюдали замечательное явление — так называемое *отрицательное поглощение света*. Пучок света, проходя через любое вещество, ослаблялся: часть фотонов пучка отражается поверхностью, а некоторое количество фотонов поглощается веществом и переходит в тепло. Но вот удалось осуществить, казалось бы, невозможное. Проходя через некоторые кристаллы, световой луч не ослаблялся, а усиливался! Откуда появилась дополнительная энергия? Оказывается, до того момента, когда через кристалл прошел луч, кристалл был подсвечен мощным источником света. Благодаря этому большая часть атомов кристалла перешла в возбужденное состояние. Из возбужденного состояния эти атомы могут перейти на более низкий энергетический уровень, испустив при этом фотон с энергией $h\nu$. Поглотить же фотон с такой энергией они не могут — они уже насытились энергией. Зато фотоны падающего пучка с энергией $h\nu$ увлекают за собой новые фотоны той же энергии, вынуждая атомы кристалла переходить в низшее состояние. В падающем пучке появляется дополнительная энергия. Такой кристалл с дополнительной подсветкой — первый шаг к лазеру.

Лазер.

Первый настоящий лазер был сделан из рубина, когда-то очень редкого камня, который теперь получают искусственно в больших количествах. Рубин — кристалл окиси алюминия Al_2O_3, в состав которого входят атомы хрома. Впервые действующий лазер был построен в 1960 г. В его рубиновом стержне — *активном теле*, по размерам и форме напоминавшем обыкновенный карандаш, содержалось всего 0,05% хрома. Рубин с таким содержанием хрома — розовый; если хрома в кристалле больше, то цвет его становится более глубоким, красным. Атомы хрома и играют главную роль в лазерном процессе. Они поглощают желтый, зеленый свет и лучи ультрафиолетовой области. Рубин оказывается поэтому прозрачным только для красного и синего света. Смесь этих излучений выходит из рубина, придавая ему характерную «рубиновую» окраску. Два энергетических участка атома хрома в кристалле рубина особенно плотно заполнены энергетическими уровнями. Эти участки ab и cd называют *полосами поглощения* (рис. 21).

Поглотив квант $h\nu_1$, атом хрома переходит на один из уровней этих полос. Но там он задерживается недолго. Он быстро отдает энергию $\Delta E'$ кристаллической решетке рубина и переходит на низший уровень AA. Этот уровень самый замечательный. Находясь в нем, атом длительное время не переходит в основное состояние. По обычным представлениям это время невелико — всего несколько

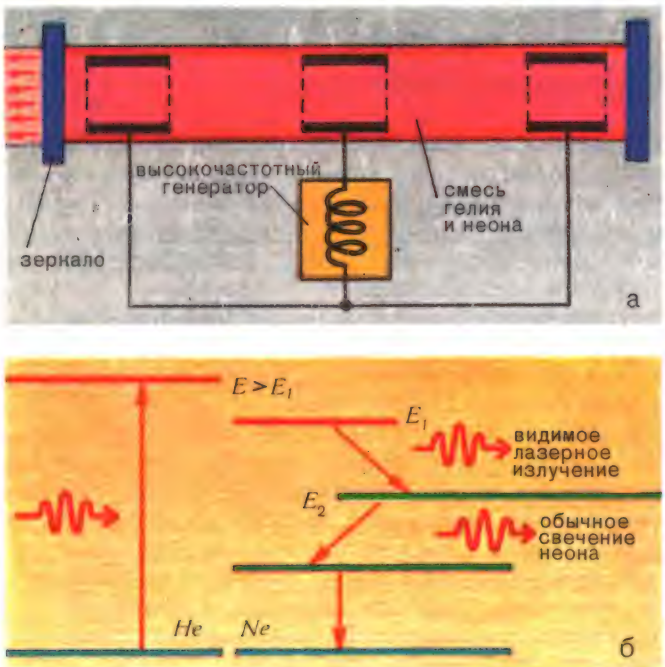


Рис. 23. Гелий-неоновый лазер: *а* — схема лазера на смеси гелия и неона; *б* — схема энергетических уровней гелия и неона. На рисунке показаны только уровни, участвующие в генерации видимого излучения газового лазера. На самом деле схема уровней и неона и гелия сложнее.

тысячных долей секунды, но в атомных масштабах оно огромно — примерно в 100 000 раз больше, чем время жизни обыкновенного возбужденного атома. Поэтому такое состояние атома называют *метастабильным*.

Рубиновый стержень мощного лазера — цилиндр диаметром в несколько сантиметров и длиной до нескольких дециметров. Его торцы хорошо отполированы, у одного из них установлено плоское зеркало, полностью отражающее свет, в то время как у другого торца зеркало частично отражает и частично пропускает световые лучи.

Чтобы получить лазерный импульс, оператор включает установку высокого напряжения. От нее заряжаются электрические конденсаторы. Затем оператор нажимает кнопку, и энергия, запасенная конденсаторами, выделяется на мощных газоразрядных лампах, окружающих рубиновый стержень. Эти лампы похожи на фотографические лампы-вспышки, только они намного мощнее. В следующее мгновение за вспышкой ламп из рубинового стержня вырывается мощный поток света. Если его сфокусировать на металлической пластинке, то лазерный свет «прожигает» в ней глубокий кратер.

Какие же физические процессы произошли за мгновение, которое длился лазерный импульс?

Вспышка газоразрядных ламп посылает множество фотонов разных энергий в тело рубинового стержня. Атомы хрома, поглотив часть этих фотонов, почти все переходят в возбужденное состояние, а затем примерно за одну стомиллионную долю секунды оказываются на метастабильном уровне AA. Такой процесс «подъема» атомов хрома или другого вещества в метастабильное состояние светом постороннего источника называют оптической накачкой.

Находящиеся в метастабильном состоянии атомы испускают спонтанные кванты по разным направлениям. Всякий раз они увлекают за собой сравнительно небольшое число фотонов, пролетая мимо атомов в метастабильном состоянии. Если спонтанный фотон идет в сторону от оси цилиндра, то все фотоны быстро покидают кристалл и мощного импульса не возникает. Лазерный импульс появляется тогда, когда рождается фотон, идущий вдоль оси лазера. Такой фотон увлекает за собой много фотонов, и число их возрастает по законам возрастания числа камней в горной лавине: фотоны многократно проходят тело рубинового стержня, отражаясь от торцовых зеркал. В результате возникает мощный импульс красного света, который выходит через полупрозрачное зеркало (рис. 22). Свет этого импульса, во-первых, монохроматический: первый испущенный по оси рубинового стержня квант может увлечь за собой кванты только такой же энергии, как у него самого. Во-вторых, лазерный луч расходится под очень малым углом — увлекаемые фотоны идут по тому же направлению, что и первый фотон-родоначальник. И наконец, излучение лазера когерентно, потому что все кванты испускаются в одной фазе.

Не только твердое тело может давать лазерный свет. Бывают и жидкостные и газовые лазеры. Если цилиндрический сосуд наполнить смесью гелия и неона, внутрь его поместить металлические электроды и подать на них высокое напряжение, то смесь газов начнет светиться красноватым светом, почти таким же, как и неоновая реклама (рис. 23). В стеклянной трубке возникает тлеющий разряд. При этом между атомами газа движется много быстрых электронов. Они сталкиваются с атомами гелия и возбуждают их. Электроны сталкиваются с неоном, но, как правило, возбуждают только низколежащие уровни неона. Возбужденные атомы гелия, сталкиваясь с атомами неона, отдают им свою энергию и возбуждают их высокие уровни. С этих высоких уровней атом неона переходит в промежуточное состояние E_1. Если теперь у торцов сосуда с гелий-неоновой смесью установить такие же зеркала, как и у торцов рубинового лазера, то фотон с энергией $E_1 - E_2$, испущенный параллельно оси сосуда, вызовет лазерное излучение. В газовом лазере

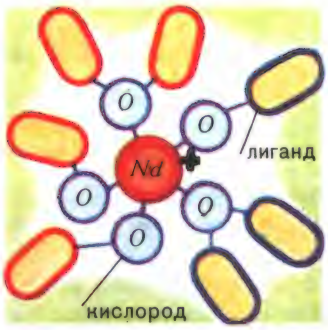


Рис. 24. Ион неодима «защищен» атомами кислорода и группами органических молекул — лигандами. Эта кольчуга позволяет ему удержать энергию возбуждения.

число возбужденных атомов неона и гелия непрерывно пополняется. Поэтому гелий-неоновый лазер излучает свет непрерывно.

Очень интересен лазер с жидким излучающим телом. Мы уже знаем, что главную роль в излучающем теле рубинового лазера играют атомы хрома.

Существуют лазеры, у которых стержень не из рубина, а из стекла, а стекло, как известно, переохлажденная жидкость. Роль атомов хрома играют добавленные в стекло атомы редкоземельного элемента неодима. Но так как атомы неодима находятся в жидкости, они будут свободнее передвигаться и очень часто сталкиваться с атомами жидкости-растворителя. При этих столкновениях возбужденные атомы неодима будут отдавать свою энергию атомам растворителя, и она будет переходить в тепло. Не поможет и то, что электроны, переход которых с орбиты на орбиту сопровождается испусканием фотонов, лежат на большой глубине электронного облака, окружающего атом неодима. Нужно было как-то защитить этот активный атом от снующих вокруг него атомов растворителя. Но как?

Эту задачу решили химики. Они заключили ион неодима в атомную кольчугу (рис. 24). Было получено такое химическое соединение, в котором ион неодима находится среди связанных с ним атомов кислорода, а они в свою очередь связаны со сложными органическими группами атомов — *лигандами*. Таким образом, атом неодима оказался защищенным от столкновений с атомами растворителя и стал вести себя так, как если бы он находился в кристаллической решетке твердого тела. Но лиганды не ограничиваются ролью защитников неодима. Они обладают еще замечательным свойством: поглощая излучение в широких областях спектра, лиганд возбуждается и при этом либо сразу переходит в основное состояние, либо долго остается в возбужденном состоянии. В первом случае испущенный лигандом фотон будет бесполезным для лазерного луча. Из метастабильного состояния лиганд передает свою энергию атому неодима и таким образом участвует в оптической накачке активных ионов неодима. Каскад фотонов в таком лазере возникает обычным путем, так же как и в других типах лазеров.

Световой телеграф

Ценность лазерного луча не только в его необычайной яркости, но еще более в его монохроматичности, когерентности. Только благодаря этим свойствам получают голограммы, а в будущем по лазерному лучу будут передавать радиопрограммы и программы телевидения.

Чтобы понять, в чем же состоят достоинства лазера как передатчика информации, рассмотрим линию связи, изображенную на рисунке 25.

Непрерывно катятся по желобу одинаковые шарики. Число шариков, проходящих с левого берега реки на правый в единицу времени, частота их появления неизменны. Пересчитывая шарики, мы можем сказать, как долго они падали из желоба, и только. Чтобы передать с помощью такого устройства какое-либо сообщение, нужно пометить шарики, например, буквами алфавита и отправлять, и принимать их в определенном порядке. Тогда количество информации (в нашем случае число букв), передаваемое за определенное время, будет пропорционально частоте появления шариков из желоба.

«Неискаженная» синусоида лазерного света подобна чистым шарикам. Зарегистрировав синусоидальное излучение каким-либо приемником, мы лишь узнаем, что включен передатчик, а также сможем установить направление его излучения. На синусоиде, как и на шариках, необходимо сделать метки, чтобы передать более существенные данные. Оказывается, эффективно можно пометить только когерентный монохроматический луч. Такой луч служит как бы чистым листом бумаги, на котором записывается информация. Нанести «метки» можно, модулируя луч, т. е. меняя амплитуду или частоту колебаний (рис. 26). Тогда передаваемые данные будут закодированы в «узорах», нанесенных на синусоиду. Чем меньше времени потребует передача «узора», тем более емким является канал связи. А это время, как видно на рисунке, обратно пропорционально частоте излучения. Значит, чем выше частота колебаний, тем большее количество информации можно передать за единицу времени. Частота электромагнитных колебаний излучения рубинового лазера 430 ТГц ($4{,}3 \cdot 10^{14}$ Гц) — в миллион раз превосходит частоту, на которой работает телевидение в наше время. Поэтому в принципе один лазерный луч способен транслировать миллионы телевизионных программ и миллиарды радиопередач. Од-

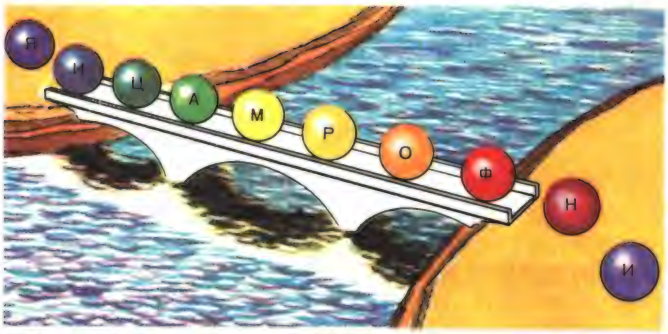


Рис. 25. Шариковый телеграф. Чем выше частота поступлений шариков с одного берега на другой, тем большее количество информации передается с берега на берег.

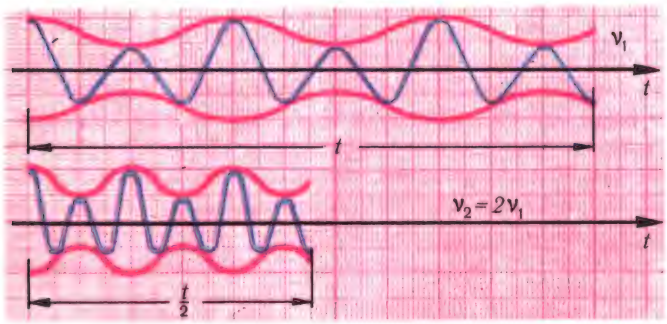


Рис. 26 *(внизу)*.

нако ученые еще не смогли найти способ эффективной модуляции колебаний столь высокой частоты. По аналогии с нашим шариковым телеграфом можно сказать, что поток лазерных шариков так быстр, что далеко не все из них удается пометить.

Потоки лазерного излучения находят множество других применений. С их помощью осуществляют тончайшие хирургические операции, измеряют расстояния, управляют химическими процессами, получают нагретую до высокой температуры плазму, исследуют строение атома.

Удивительные превращения

Если опираться на теорию Максвелла, то из нее следует, что свет должен проходить через прозрачное вещество, не меняя частоты колебаний.

Поведение светового пучка в веществе полностью определяется его частотой и показателем преломления среды, если не учитывать явлений, связанных с поляризацией света. Но если осветить кварцевую пластинку K мощным световым потоком рубинового лазера, то в луче, прошедшем кварц, появятся колебания с частотой, отличной от частоты красного света лазера. В этом можно убедиться, направив пучок на призму $П$. В луче содержится синий свет с длиной волны 0,347 мкм (рис. 27, *а*).

Откуда взялся синий свет? Оказывается, взаимодействие света с веществом может послужить причиной изменения его частоты. В световой волне колеблются электрическое и связанное с ним магнитное поля. Напряженность электрического поля солнечного луча в хорошую погоду у земной поверхности составляет около 1000 В/м. Такая незначительная напряженность электрического поля может сдвигать только очень слабо связанные электроны атомных оболочек. Под действием света в веществе начинаются колебания электронов с частотой, равной частоте колебаний в падающем световом луче. Эти колебания создают вторичное световое излучение с той же частотой. Поэтому, проходя через вещество, солнечный свет не может вызвать появления новых частот в спектре.

Однако в фокусе линзы, собравшей лазерный луч, напряженность электрического поля световой волны может достигать 1 000 000 000 В/м! Такая мощная световая волна не только сдвигает электроны внешних атомных оболочек, но вызывает и более существенные изменения. У кристаллов, не имеющих центра симметрии, электроны в одну сторону будут сдвинуты сильнее, чем в другую (рис. 27, *б*). Положение смещенных электронов теперь уже не повторяет форму падающей волны. Колеблясь, смещенные таким образом электроны создадут две световые волны: с частотой падающего света и с частотой вдвое больше. Появится еще и постоянный электрический ток! Электроны сместятся одинаково в обе стороны, но при этом не повторят форму падающей световой волны.

Посмотрим на пружины (рис. 27, *в*). Все они одинаковы по своим характеристикам. Допустим, что к первой подвешен груз массой 5 кг, ко второй — массой 8,7 кг, а к третьей — массой 10 кг. Под действием веса груза первая пружина растянулась на 5 см, а вторая растягивается только на 8,6 см, хотя на нее действует вес гири массой 8,7 кг. Третья пружина опускается вместо 10 см на 9,5 см. Наши грузы теперь не повторяют синусоидальной кривой закона, по которому подобран их вес, пропорциональный массам грузов. С увеличением прикладываемой силы пружина начиная с определенного момента оказывает большее сопротивление растяжению, чем вначале. Так же и электроны в атомах. Можно представить, что они прикреплены к атомному ядру как бы на пружинах. Конечно, на деле их удерживают в атоме электрические силы, но эти силы по своему действию подобны нашим пружинам. Таким образом, когда напряженность электрического поля световой волны велика, смещение электронов, так же как смещение гирь, не повторяет форму падающей волны. На рисунке мы видим, что такую смещенную цепочку электронов можно представить двумя синусоидами; у одной длина волны такая же, как и у падающего света, а у второй втрое ко-

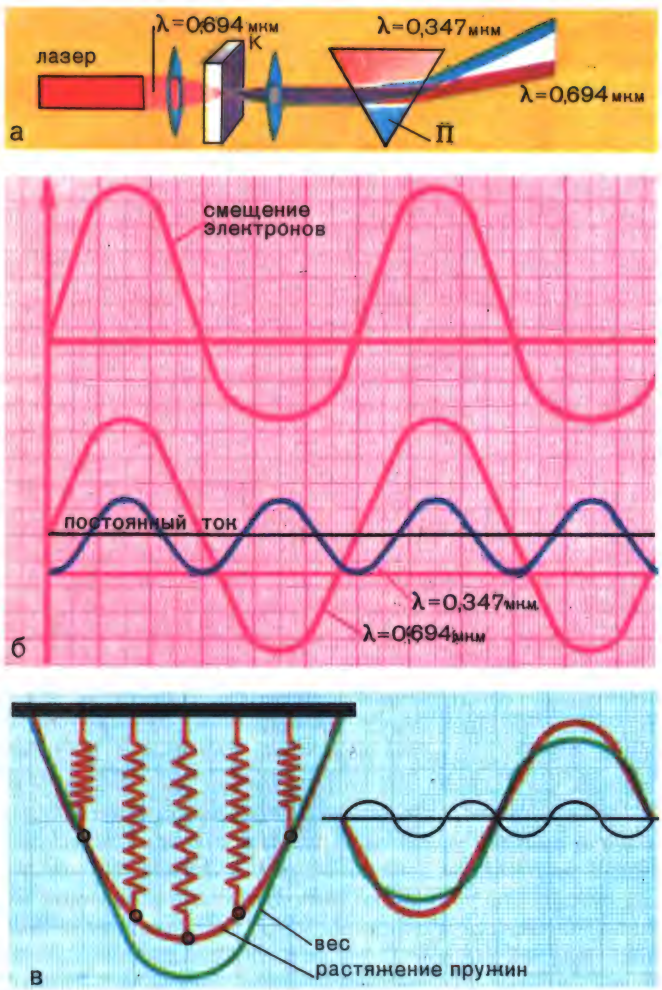


Рис. 27. Нелинейные эффекты при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом: *а* — прохождение мощного лазерного луча через кварц; *б* — смещенные электроны начинают колебаться. Возникает излучение с частотой падающего света и с удвоенной частотой. Сумма этих колебаний воспроизводит кривую смещения электронов. Кроме светового излучения при несимметричном смещении электронов возникает постоянный электрический ток; *в* — если электроны смещаются световым излучением симметрично, то может возникнуть свет с частотой колебаний втрое большей, чем частота падающего света.

роче. Облучая кальцит мощным лучом рубинового лазера, можно получить излучение с длиной волны 0,2314 мкм, т. е. втрое меньшей длины волны рубинового лазера.

Но если в веществе интенсивный лазерный луч распространяется по-иному, то он и преломляется в веществе, и отражается от поверхности тела не так, как обычный: появляются фотоны большой энергии. Вещество, пропускающее свет обычной силы, становится непрозрачным для мощного пучка. Все эти явления образовали новый раздел физики, называемый *нелинейной оптикой*.

Каблограмма Рамана

Изменение частоты колебаний света, проходящего через вещество, наблюдалось учеными задолго до изобретения лазера. В 1928 г. индийский ученый Ч. Раман изучал рассеяние света в жидкостях. В это же время советские физики Г. С. Ландсберг и Л. И. Мандельштам исследовали спектры светового луча, рассеивающегося в твердых прозрачных телах. К своему удивлению, вместе со спектральными линиями источника, освещающего тело, ученые обнаружили новые линии — линии-спутники, лежащие по обе стороны от спектральных линий источника.

Сразу же после своего открытия Раман по трансатлантическому кабелю послал краткое сообщение о своем наблюдении. Статья же советских ученых была опубликована позднее сообщения Рамана. Поэтому появление линий-спутников в рассеянном свете ныне называют *Рамана эффектом*. Это явление еще называют *комбинационным рассеянием*.

Остановимся теперь на существе комбинационного рассеяния света. Когда поток квантов с энергией $h\nu$ сталкивается с молекулами жидкости, то молекулы могут обмениваться своей энергией с фотонами. В процессе комбинационного рассеяния фотон внешнего источника света поглощается молекулой, и сразу же излучается другой фотон. При этом фотоны увеличивают или уменьшают свою энергию также квантами с энергией ΔE, равной энергии возбуждения молекул жидкости. Если молекула находится в невозбужденном состоянии, то фотон отдает ей энергию ΔE, а если молекула возбуждена, то может случиться так, что фотон получит от молекулы ее энергию возбуждения ΔE. В результате возникают фотоны с энергиями $h\nu + \Delta E$ и $h\nu - \Delta E$. Таким образом, спутники спектральных линий источника света обладают интересным свойством — их частота «комбинируется» из частоты падающего на тело источника света и собственной частоты колебаний молекул при их возбуждении. Если лазерный луч пропустить через нитробензол, то в прошедшем через нитробензол свете будет содержаться частота на 40 биллионов Гц меньше частоты испускаемого лазером света. Это и есть частота, характерная для молекул нитробензола.

Под действием лазерного излучения в веществах возникают значительные потоки фотонов рамановского излучения. Если эти фотоны будут многократно проходить, скажем, через нитробензол, то за ними

будут увлекаться новые и новые фотоны такой же энергии. Это явление называется *вынужденным комбинационным рассеянием*. Все происходит, как и при излучении лазера, только нет первоначального возбуждения оптической накачкой. При этом значительная доля лазерного светового потока становится светом с большей или меньшей длиной волны.

Если лазерное излучение сфокусировать в интенсивный пучок, то, пропуская его через жидкие, твердые и газообразные тела, можно во многих случаях получить интенсивное рамановское излучение. Так получаются когерентные излучения в новых областях спектра с длинами волн, лежащих и в ультрафиолетовой, и в инфракрасной области спектра.

Петр Николаевич Лебедев (1866—1912)

Русский физик. Открыл и измерил давление света на твердые тела (1899) и газы (1907), что экспериментально подтвердило электромагнитную теорию света и принесло Лебедеву мировую славу. Доказал, что у электромагнитных волн есть не только энергия, но импульс и масса. Ему удалось получить наиболее короткие для того времени электромагнитные волны.

Спектры и скорость

Тон гудка локомотива повышается, когда он приближается к наблюдателю, и спадает при удалении. То же самое происходит со светом. Частота света также меняется, если меняется скорость источника света относительно наблюдателя. Допустим, что водитель фотонной ракеты забыл снизить скорость на космическом перекрестке. Тогда красный свет светофора для него казался бы зеленым и он нарушил бы неведомые нам космические правила. Если наблюдатель движется навстречу световой волне со скоростью v, то частота световой волны будет для него равной: $\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}}$, где c — скорость света, ν_0 — частота световой волны для наблюдателя, неподвижного относительно источника света.

По этой формуле мы можем рассчитать скорость фотонной ракеты, необходимую для того, чтобы красный свет показался зеленым: 97 000 км/с. Изменение длины волны при движении источника света и наблюдателя относительно друг друга называется *эффектом Доплера*. Этот эффект часто затрудняет спектральные исследования. Современные приборы разделяют линии спектра, у которых длины волн различаются лишь на 0,0002 нм ($2 \cdot 10^{-13}$ м). Однако это не помогает различить, или, как говорят физики, разрешить, очень близко отстоящие друг от друга спектральные линии. Атомы в нагретом газе движутся по разным направлениям. Частота кванта, испущенного атомом, который удаляется от спектрографа, сместится в область длинных волн, а если атом движется в обратном направлении — к спектрографу, то частота кванта, наоборот, сместится в область коротких волн. Спектральная линия атома как бы расширяется в результате движения атомов.

Земля мчится по орбите с большой скоростью. Можно выбрать на небосводе такую звезду, что полгода Земля будет двигаться по тому же направлению, что и свет звезды, а полгода это движение будет встречным. Спектр звездного света в первую половину года сдвинется в длинноволновую часть, а во втором полугодии — в коротковолновую. По этому сдвигу можно рассчитать скорость движения Земли по ее орбите. Конечно, практического значения такой расчет не имеет — существуют более надежные методы определения скорости движения Земли вокруг Солнца. Зато эффект Доплера позво-

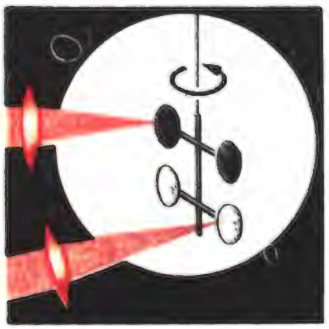


Рис. 28. Определение давления света.

ляет измерять скорость, с которой далекие галактики движутся относительно Земли. Оказывается, ни одна из них не приближается к Солнечной системе. Происходит обратное: галактики удаляются от нас — Вселенная расширяется. Далекие галактики движутся с очень большой скоростью. Об этом мы узнаем по сдвигу спектральных линий в сторону более длинноволнового красного участка спектра. Этот сдвиг физики называют *красным смещением.*

Световое давление

Мы знаем, что свет поглощается веществом и передает ему свою энергию. Но оказывает ли световой поток на тело механическое воздействие? Еще в давние времена неоднократно высказывались предположения о существовании светового давления. В 1604 г. немецкий астроном Кеплер объяснил форму хвоста кометы влиянием светового давления. Однако теоретически доказать существование светового давления удалось лишь 250 лет спустя английскому физику Максвеллу. Он вычислил световое давление, исходя из теории электромагнитного поля.

По расчетам Максвелла получалось, что если за 1 с на единицу площади падает и полностью поглощается световая энергия E, то световое давление q равно $\frac{E}{c}$. При полном отражении света давление будет вдвое больше: $\frac{2E}{c}$.

Если представить себе свет, падающий на какую-то отражающую поверхность, как поток частиц-фотонов, то фотоны можно рассматривать как обычные мячики. Когда фотон падает перпендикулярно к идеальной отражающей поверхности, его вектор количества движения меняет свое направление на противоположное. Полное изменение Δp этого вектора равно $2p$. Величина Δp есть давление на поверхность, на единицу площади которой падает один фотон ежесекундно.

Сравним полученный результат с формулой Максвелла. По этой формуле $q = \frac{2E_ф}{c} = 2p$, если на поверхность падает в секунду один фотон с энергией $E_ф$. Из предыдущей формулы следует: $E_ф = pc$, где p — количество движения фотона. Но количество движения частицы равно ее массе, умноженной на скорость. Скорость фотона — это скорость света. Отсюда можно прийти к выводу: $E_ф = m_ф c^2$. Если этот вывод обобщить, то энергия любой частицы массы m равна $E = mc^2$!

На 1 м^2 площади поверхности в солнечный полдень световые лучи действуют с силой около 0,00039 Н. Это небольшая сила, и поэтому ее не удавалось долгое время измерить опытным путем. Ученые стали сомневаться в результатах, полученных Максвеллом. Важно было подтвердить их опытами.

Существование светового давления впервые установил русский физик П. Н. Лебедев в 1899 г. На тонкой нити он подвесил пару черных и пару блестящих зеркальных крылышек (рис. 28).

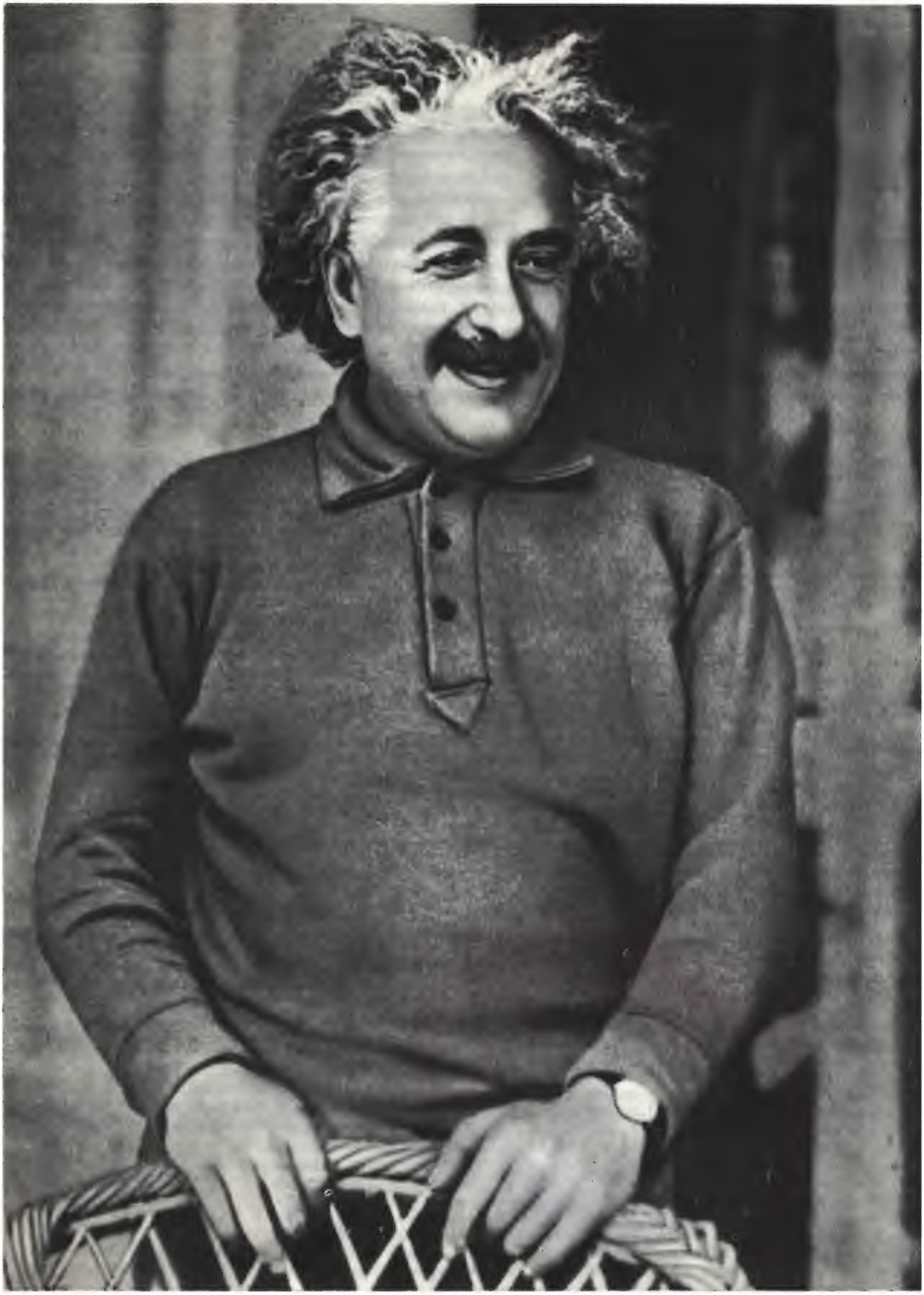
Все устройство было помещено в вакуум. Свет практически полностью отражался от зеркальной поверхности крылышка, и его давление на это крылышко было вдвое большим, чем на зачерненное. Благодаря этому устройство поворачивалось, и по углу поворота можно было определить силу, действующую на крылышки, а значит, и давление света.

На первый взгляд опыт кажется простым. Однако такое впечатление обманчиво. «Я всю свою жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его световое давление, и вот опыты Лебедева заставили меня сдаться», — сказал английский физик Томсон, познакомившись с опытами русского ученого.

Альберт Эйнштейн (1879—1955)

Великий ученый-физик; до 1933 г. жил в Германии, затем в США; член многих академий наук, почетный член Академии наук СССР, лауреат Нобелевской премии (1921). Выдающийся вклад Эйнштейна в науку — создание теории относительности. В 1905 г. им была опубликована в почти законченном виде специальная, или частная, теория относительности.

В 1907—1916 гг. создана общая теория относительности, которая объединяет современное учение о пространстве и времени с теорией тяготения. Кроме того, Эйнштейн дал объяснение закономерностям фотоэлектрического эффекта, разработал теорию броуновского движения, провел важные исследования в области квантовой теории света, развил основы квантовой статистики. По масштабу переворота, совершенного Эйнштейном в физике, его часто сравнивают с Ньютоном. Не случайно В. И. Ленин назвал Эйнштейна одним из великих преобразователей естествознания.



Притягиваются ли телами фотоны?

Любые тела во Вселенной притягиваются друг к другу по закону всемирного тяготения, открытому Ньютоном более 200 лет назад. А как обстоит дело со светом? Притягиваются ли телами фотоны — эти частички светового потока?

В начале нашего века Альберт Эйнштейн начал разрабатывать очень сложную физическую теорию, которая получила название общей теории относительности. По расчетам Эйнштейна выходило, что притяжение света можно обнаружить только в очень сильных полях тяготения, например на малых расстояниях от поверхности Солнца.

И вот в начале 1919 г. были снаряжены две экспедиции. Одна из них расположилась неподалеку от бразильского города Сорбаль, а другая — на острове Принчипе у берегов Западной Африки. В этих местах в мае 1919 г. должно было наступить полное солнечное затмение. Кроме обычных исследований было решено проверить выводы эйнштейновской теории. Нужно было определить положение звезд, видимых в телескоп на одном и том же участке неба,

Это интересно!

Знаменитый американский ученый Альберт Майкельсон почти всю жизнь посвятил измерению скорости света. Однажды ученый осматривал предполагаемый путь светового луча вдоль полотна железной дороги. Он хотел построить еще более совершенную установку для еще более точного метода измерения скорости света. До этого он уже работал над этой проблемой несколько лет и добился самых точных для того времени значений. Поведением ученого заинтересовались газетные репортеры и, недоумевая, спросили, что он тут делает. Майкельсон объяснил, что он измеряет скорость света.

— А зачем? — последовал вопрос.

— Потому что это дьявольски интересно,— ответил Майкельсон.

И никто не мог предполагать, что эксперименты Майкельсона станут фундаментом, на котором будет построено величественное здание теории относительности, дающей совершенно новое представление о физической картине мира.

Пятьдесят лет спустя Майкельсон все еще продолжал свои измерения скорости света.

Как-то раз великий Эйнштейн задал ему такой же вопрос.

— Потому что это дьявольски интересно! — спустя полвека ответил Майкельсон и Эйнштейну.

Как запомнить!

Ученики старой гимназии, чтобы лучше запомнить порядок расположения цветов в солнечном спектре, придумали забавное изречение:

Каждый (красный)
охотник (оранжевый)
желает (желтый)
знать (зеленый),
где (голубой)
сидит (синий)
фазан (фиолетовый).

Пожалуй, кое-кому из вас это «мудрое» правило может оказаться полезным.

в двух случаях — когда звездные лучи идут вдалеке от Солнца и в момент, когда они падают на Землю, проходя вблизи солнечного диска. Это последнее наблюдение можно сделать только во время полного солнечного затмения, иначе звезды не будут видны на фоне яркого света, рассеиваемого атмосферой.

29 мая 1919 г. ученые убедились — луч света отклоняется притяжением Солнца. Именно так, как предсказывала общая теория относительности. Узнав об этом, Эйнштейн написал Планку: «Судьба оказала мне милость, позволив дожить до этих дней...»

В наши дни удалось измерить приращение скорости γ-кванта за счет притяжения его Землей.

Наука о свете

Над тайнами светового потока размышляли многие поколения ученых. Создавались замечательные теории. Для их проверки ставились тонкие и изящные опыты. Еще древним грекам был известен закон о прямолинейном распространении света. Ньютон показал, что белый свет сложный, и разложил его на простые цвета. Гюйгенс высказал предположение о волновом характере света, а Френель блестяще

Вселенная расширяется

Все началось в 1912 г. Американский астроном В. М. Слайфер решил изучить спектры далеких галактик. На них он и направил телескоп, свет которого поступал на спектрограф. К удивлению Слайфера, на фотопластинках спектральные линии оказались не совсем там, где им полагалось быть,— они сместились к красному концу спектра, т. е. в сторону длинных волн. Это наблюдение было совершенно непонятно и необъяснимо.

В 1922 г. советский ученый Александр Фридман, развивая теорию относительности, пришел к выводу, удивившему даже Эйнштейна, что размеры Вселенной могут зависеть от времени. Это подтвердилось.

В 1929 г. Эдвин Хаббл и Милтон Хьюмасон установили, что скорость v удаления галактики от Земли пропорциональна расстоянию r Земля — галактика: $v=\frac{r}{3\cdot10^{17}}$. Здесь $^1/_3\cdot10^{-17}c^{-1}$ — постоянная Хаббла (r выражено в м, v — в м/с).

Оказалось, что почти все галактики разлетаются от нас и некоторые летят со скоростью, близкой к половине скорости света!

Ныне большинство ученых разделяют такой взгляд на развитие Вселенной. Вначале все вещество было сосредоточено в незначительном по сравнению с нынешним объеме. Если скорость отдаленной галактики не менялась со времени возникновения Вселенной, то она находится в пути время $T=\frac{r}{v}=3\cdot10^{17}$с, равное величине, обратной постоянной Хаббла. Таким образом, эту величину можно рассматривать как возраст Вселенной: $3\cdot10^{17}$с равняется 10 млрд лет.

Картина окружающего нас мира, созданная Хабблом, получила название «расширяющаяся Вселенная».

Интересно отметить, что, на какую бы галактику ни «сел» наблюдатель, ему всегда будет казаться, что он в центре расширяющейся Вселенной. Наблюдателю в галактике A будет казаться, что галактики $Б$ и $В$ летят от него вправо. Наблюдателю в галактике $Б$ будет казаться, что галактика A движется от него влево, а галактика B удаляется вправо. От наблюдателя в галактике B галактики A и $Б$ движутся влево. При этом для всех наблюдателей справедлив один и тот же закон: $v=\frac{r}{3\cdot10^{17}}$.

Это случилось в Париже

Французский ученый-физик Этьен Малюс, устав от забот тяжелого дня, любовался закатом. Солнечные лучи отражались в великолепных окнах Люксембургского дворца, возвышавшегося на противоположном берегу Сены. Случайно в руках Малюса был кристалл исландского шпата. По детской привычке — мальчиком Анри любил рассматривать небосклон через цветные стеклышки — ученый поднес кристалл к глазам. Повернув кристалл, он заметил, что свет в оконных стеклах померк. Оказалось, что, вращая пластинку исландского шпата, можно было усилить или ослабить отраженный свет. Малюс проверил это явление в лаборатории. Получалось, что не только солнечный, но и свет любого источника, отраженный стеклом или другой полированной поверхностью, меняет свою яркость в зависимости от угла поворота кристалла. Это явление в 1808 г. Малюс назвал поляризацией света. С тех пор слова «поляризация света» прочно вошли в словарь физиков и инженеров. Поляризованный свет позволяет измерять концентрацию растворов, определять механические напряжения в сложных конструкциях. На этом явлении основано устройство быстродействующих фотографических затворов.

развил его взгляды. Максвелл доказал, что световая волна — это электромагнитные колебания. Бунзен и Кирхгоф первыми по линейчатым спектрам атомов начали анализировать состав вещества, Лебедев измерил давление света. Изучая проблемы излучения накаленных тел, Планк выдвинул понятие кванта, ставшее первым шагом на пути разработки квантовой механики — теоретической основы современной физики. Нильс Бор, анализируя спектры водорода, раскрыл тайну строения электронных оболочек атомов.

Многие ученые считали, что в науке, изучающей свет, трудно ожидать революционных открытий. Но вот уже в 1960 г. были разработаны источники когерентного света — лазеры. Появились новые разделы физики — нелинейная оптика, голография. С помощью лазеров удалось создать невиданные по мощности потоки энергии. Лазерная связь, использование лазеров для стимулирования химических реакций, в оптической локации (с помощью лазера, например, с невиданной точностью было измерено расстояние Земля — Луна), в технологии и приборостроении — вот далеко не полный перечень применения этих замечательных источников света в технике.

Наука о свете опять оказалась на передовых рубежах исследовательской и технической деятельности человека.

Электричество и магнетизм

Электромагнитные взаимодействия

Условия жизни на нашей планете преобразились благодаря тому, что и в больших городах, и в селах рядом с нами оказывается розетка, в которой поддерживается напряжение 127 или 220 В.

Располагая розеткой под напряжением или батареей, можно с помощью различных устройств, иногда очень простых, получить многое. Электрическая лампочка, подключенная проводниками к источнику напряжения, дает свет, электроплитка — тепло. Это очень простые устройства. Несколько сложнее устроен электромотор. Включенный в электрическую цепь, он может приводить в движение игрушечный автомобильчик, пылесос, стиральную машину, электробритву и т. д. На заводах мощные электромоторы приводят в движение различные станки, на железных дорогах — мощные электровозы. Наконец, и для работы таких сложных устройств, как радио и телевизор, необходим источник напряжения.

Если вы заглянете внутрь обычного радиоприемника, то увидите слабо мерцающие лампы, сплетение разноцветных проводов, круглые или прямоугольные коробки — конденсаторы, катушки на железных сердечниках. Стоит повернуть ручку настройки, и вы услышите вместо детской передачи музыку. Но видимого движения чего-либо внутри радиоприемника нет. Точно так же вы не заметите движения, включая в сеть лампочку или электроплитку.

Но на самом деле движение в лампах и проводниках приемника, в нити накаливания лампочки или спирали плитки есть! По всем проводникам, подключенным к источнику напряжения, течет электрический ток. Самого тока и того, как он течет, мы не видим. Однако о присутствии тока в проводниках можно судить по тем действиям или явлениям, которыми сопровождается протекание тока.

Тепловое действие тока известно всем. Проводник, по которому течет ток, нагревается и выделяет тепло. Поэтому на электроплитке можно вскипятить чайник, а в электропечи расплавить металл. Волосок лампочки накаливания разогревается так сильно, что ярко светится.

Растворив медный купорос в воде и опустив туда угольные стерженьки, присоединенные к батарее (рис. 1), вы через несколько минут сможете увидеть, что стержень, присоединенный к отрицательному полюсу батареи, стал красным: на нем выделилась медь, входящая в состав медного купороса. Это явление — выделение током составных частей некоторых проводников — называется *электролизом* и широко используется в технике для покрытия металлических изделий (обычно стальных) тонким слоем никеля или хрома, защищающим изделия от ржавления и делающим их красивыми.

Самым важным действием тока является магнитное действие. Его открыл в 1820 г. датский физик Х. К. Эрстед. Поместив магнитную стрелку вблизи

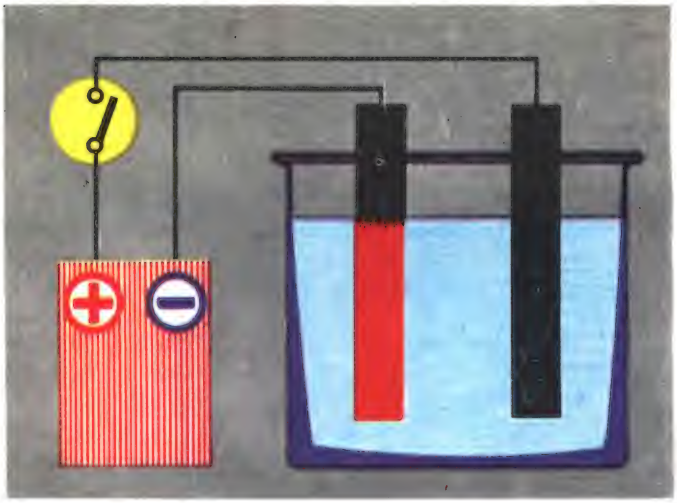


Рис. 1. Электролиз медного купороса.

Рис. 2. Опыт Эрстеда. Если расположить проводник вдоль магнитной стрелки, то при включении тока стрелка поворачивается и устанавливается поперек направления проводника. *Вверху:* тока в проводнике нет; *внизу:* ток включен.

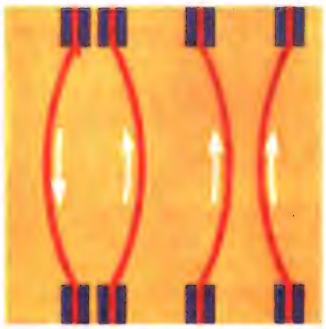


Рис. 3. Взаимодействие токов.

проводника с током, Эрстед обнаружил, что она поворачивается (рис. 2). Такой опыт вы можете без особого труда проделать и сами.

Особое значение магнитного действия тока прежде всего в том, что оно имеется всегда! Химическое действие обнаруживается только при прохождении тока через растворы солей, кислот и т. д., но не при прохождении его по металлической проволоке. Тепло также выделяется в проводнике не всегда. Существуют сверхпроводники, в которых тепло не выделяется совсем. Магнитное действие является самым общим признаком наличия тока.

Когда проводник с током действует на магнитную стрелку, то она в свою очередь тоже с некоторой силой действует на проводник. Можно вместо стрелки взять другой проводник с током. При этом обнаружится магнитное действие одного проводника на другой. Если токи текут в одном направлении, то они будут притягиваться, если в противоположных, то отталкиваться (рис. 3).

Что такое электрический ток? *Электрическим током* называется упорядоченное движение электрически заряженных частиц. Выражение «ток течет» не означает ничего другого, кроме утверждения о перемещении таких частиц. Заряженные частицы могут быть самыми разнообразными. Самая легкая заряженная частица, существующая в природе, называется *электроном*. Из электронов построены оболочки всех атомов.

В металлических проводниках электрический ток — это движущиеся в одном направлении электроны. В жидкостях, проводящих электричество, ток представляет собой направленное перемещение ионов. *Ионы* — это атомы, у которых либо не хватает электронов до полного комплекта (такой ион называется *положительно заряженным*), или же, напротив, электроны присутствуют в избытке *(отрицательные ионы)*. Ток в газах образуется при упорядоченном движении как ионов, так и электронов.

После всего сказанного о токе возникает немало вопросов. Первый вопрос: что же заставляет заряженные частицы двигаться? Второй: почему движение заряженных частиц вызывает те разнообразные действия, о которых говорилось? И наконец, самый главный вопрос: а что, собственно, такое электриче-

ский заряд частиц, образующих ток, и откуда эти частицы берутся? Вот с ответа на последний вопрос и начнется наш рассказ об электричестве и магнетизме.

Электрический заряд и заряженные частицы

Прежде чем понять, что такое электрический заряд, мы попытаемся выяснить, что скрывается за словами: «данная частица или тело имеет электрический заряд». Это не совсем одно и то же, и последнее проще для понимания.

Все тела в природе построены из мельчайших частиц, которые называются *элементарными частицами*. Эти частицы имеют массу и благодаря этому притягиваются друг к другу силами всемирного тяготения. Точно так же, как все тела притягиваются к Земле, а Земля и другие планеты к Солнцу. С увеличением расстояния между телами или частицами силы всемирного тяготения убывают. При увеличении расстояния вдвое силы убывают в 4 раза; втрое — в 9 раз и т. д. Сила взаимного тяготения обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Большинство элементарных частиц, хотя и не все, кроме того, способны взаимодействовать друг с другом с силой, также убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния, но в огромное число раз превосходящей силу тяготения. Если частицы способны к такого рода взаимодействиям, то мы говорим, что они имеют электрический заряд. Сам заряд — это количественная мера способности тела к электромагнитным взаимодействиям. Эти взаимодействия называются *электрическими* или (по причинам, о которых будет сказано позднее) *электромагнитными*. Электрическая сила взаимодействия между электроном и протоном (ядром атома водорода) в 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз больше силы всемирного тяготения.

Может показаться, что такого определения заряда явно недостаточно. Но, к сожалению, ничем здесь не поможешь. Заряд — это не особый механизм в частице, который можно было бы снять с нее, разобрать на части, посмотреть, как он действует, и снова собрать. Под зарядом частицы в науке понимается способность частицы в целом взаимодействовать с другими частицами определенным образом, и ничего больше. Короче говоря, бывают частицы без заряда, но не существует зарядов без частиц. Примерно так же вы можете видеть лицо без улыбки, но никогда улыбку без лица.

В природе имеются частицы с зарядами противоположных знаков. Заряд электронов считают отрицательным, а заряд элементарных частиц — протонов, входящих в состав атомных ядер,— положительным. Положительный знак заряда у частицы не означает наличия у нее каких-либо особых достоинств. Приходится говорить о зарядах двух знаков просто потому, что заряженные частицы могут как притягиваться, так и отталкиваться друг от друга. При одинаковых знаках заряда частицы отталкиваются, а при разных — притягиваются.

Андре Мари Ампер (1775—1836).

Частицы могут иметь заряд, а могут и не иметь. Но если уж элементарная частица имеет заряд, то величина его будет строго определенной. Различными могут быть только знаки заряда. «Отщипнуть» часть заряда у электрона оказывается невозможным. Почему электрический заряд не может быть меньше или больше, чем заряд электрона, сейчас не знает никто.

До сих пор говорилось только о зарядах элементарных частиц. Тело больших размеров (его обычно называют *макроскопическим*), как легко себе представить, будет электрически заряжено, если оно содержит больше элементарных частиц одного знака, чем другого. Большинство тел электрически нейтрально, так как число электронов у них равно числу протонов — положительно заряженных частиц, входящих в состав атомных ядер. Нейтрален атом любого вещества. В атоме отрицательно заряженные электроны связаны с положительно заряженным ядром в единую устойчивую систему.

Так как каждая элементарная частица наделена одной, либо положительной, либо отрицательной, порцией заряда, то число порций электрического заряда в мире равно числу электрически заряженных элементарных частиц. Если бы с частицами не происходило никаких превращений, они не рождались бы заново и не исчезали, то, конечно, неизменным оставалось бы и число порций — элементарных зарядов. Но в действительности частицы могут и появляться и исчезать, могут превращаться друг в друга.

Замечательно, что разность между числом положительно и отрицательно заряженных частиц остается неизменной. Рождаются заряженные частицы только парами с зарядами противоположных знаков. И исчезают при превращениях тоже только парами. В результате полный электрический заряд Вселенной остается неизменным. Точнее, не меняется сумма всех электрических зарядов, если учитывать, что в эту сумму одни из них входят со знаком «плюс», а другие — со знаком «минус». В этом состоит *закон сохранения электрического заряда.*

Заряд и законы электромагнитных взаимодействий

Чем лучше и полнее мы будем знать законы взаимодействия заряженных частиц, тем более полным будет наше представление о том, что же такое электрический заряд.

Если заряды неподвижны относительно друг друга, то между ними действуют сравнительно простые электрические силы, подобные силам всемирного тяготения. Но когда заряды приходят в движение, между ними возникает дополнительное взаимодействие, зависящее от скоростей движения. Оно называется магнитным. Поэтому взаимодействия заряженных частиц в общем случае носят название *электромагнитных.*

В повседневной жизни и в технике, за исключением притяжения к Земле и приливов в океане, мы встречаемся с различными видами электромагнитных взаимодействий.

Так, силы упругости, которые позволяют твердым телам сохранять свою форму, жидкостям — свой объем и препятствуют сжатию газа, имеют электромагнитную природу. Давление пара в цилиндре паровой машины или давление взорвавшейся смеси паров бензина и воздуха в двигателе внутреннего сгорания обусловлены электромагнитными взаимодействиями. Ту же электромагнитную природу имеют силы наших мышц и мышц различных животных.

Электромагнитные силы позволяют видеть книгу, которую вы читаете, ибо свет — одна из форм электромагнитных взаимодействий. Сама жизнь немыслима без этих сил. Живое существо, и человек в том числе, как показали многочисленные полеты космонавтов, способно длительное время находиться в состоянии невесомости, когда силы тяготения никак не проявляются. Но если бы на мгновение прекратилось действие электромагнитных сил, то сразу исчезла бы и жизнь.

При взаимодействии частиц в самых компактных системах природы — в атомных ядрах (отталкивание протонов) и при взаимодействии космических тел (посредством света) электромагнитные силы играют выдающуюся роль. Строение атомной оболочки, сцепление атомов в молекулы (химические силы) и образование кусков вещества определяются исключительно электромагнитными взаимодействиями.

Кроме электромагнитных сил современной науке известно пока только три типа сил: силы всемирного тяготения (или гравитационные), ядерные силы (или сильные взаимодействия) и слабые взаимодействия.

В безграничных просторах Вселенной, на нашей планете, в любом куске вещества, в живых организмах, в атомах, в атомных ядрах и, наконец, при превращениях элементарных частиц мы встречаемся с проявлениями сил только четырех типов. И первое место среди них по широте и разнообразию проявлений принадлежит силам электромагнитным.

Силы всемирного тяготения вполне оправдывают свое название. Они действуют между всеми телами без исключения. Даже световой луч искривляется немного, проходя возле таких больших тел, как звезды. Но эти силы слабы, невероятно слабы по сравнению с электромагнитными. Лишь при взаимодействии огромных космических тел они становятся существенными. Сила же гравитационного притяжения вашей головы к книге, которую вы сейчас читаете, не превосходит 0,1 мкН (10^{-7}Н).

Ядерные силы, напротив, очень велики. Не только на Земле, но и во всей Вселенной нет сил, превосходящих по размеру ядерные. Электромагнитные силы они превосходят в 100 раз. Но ядерные силы — это «гигант с короткими руками». Они сказываются только на очень малых расстояниях, порядка размеров самого атомного ядра (10^{-13} см). Поэтому в основном их роль сводится к обеспечению устойчивости атомных ядер.

Слабые взаимодействия в соответствии со своим названием в биллион, т. е. в 10^{12}, раз слабее электромагнитных. К тому же они еще более короткодействующие, чем ядерные силы. В результате сфера их

Рис. 4. Лейденская банка.

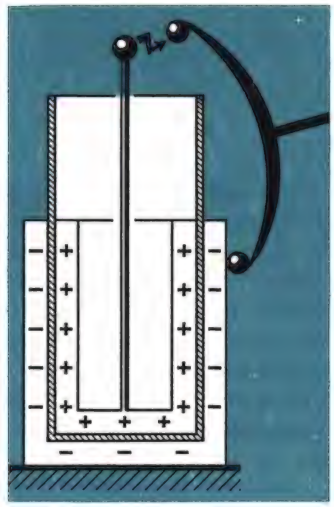


Рис. 5. Молния.

деятельности оказывается крайне узкой, хотя отнюдь и не незначительной в жизни Вселенной. Они вызывают распад большинства нестабильных элементарных частиц. Вследствие их действия в мире существует только два вида стабильных заряженных частиц: электроны и протоны. Множество других частиц: разного рода мезоны и тяжелые частицы — *гипероны* живут не более миллионной доли секунды.

Взаимодействие неподвижных заряженных тел. Электрическое поле

Когда впервые появилось слово «электрон»? Элементарная частица — электрон — была открыта английским физиком Джозефом Джоном Томсоном в конце XIX в. Однако само это слово существовало с незапамятных времен. «Электрон» по-гречески — «янтарь».

Вероятно, древнегреческие ткачи впервые обратили внимание на то, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает к себе легкие предметы, не соприкасаясь с ними. Потом выяснилось, что и другие тела — стекло, эбонит и т. д., потертые о мех или кожу, приобретают такое же свойство. Их стали называть наэлектризованными. Отсюда и берут свое начало слова «электричество», «электрический».

В опытах по электризации трением люди впервые столкнулись с явным действием сил, играющих главную роль почти во всех процессах природы. Но поняли это через много сотен лет.

К середине XVIII в. электричество по-прежнему оставалось таинственным. Никто не умел измерять электрический заряд тела, никакие количественные законы не были известны. Была открыта возможность передачи электричества по проводникам — влажной веревке или металлической проволоке; построили электрическую машину, которая могла давать большое количество электричества, что позволило наблюдать электрические искры; научились накапливать электричество в так называемой лейденской банке, состоящей из цилиндрического стеклянного сосуда с двумя металлическими обкладками снаружи и внутри (рис. 4). Разряд лейденской банки имел заметную мощность. Это открытие произвело огромное впечатление на всех людей, даже совершенно далеких от науки. Каждый хотел испытать электрический разряд на себе и увидеть его действие на других.

Слухи об «электрических опытах» дошли из Европы до Филадельфии в Северной Америке, и выдающийся ученый и общественный деятель В. Франклин впервые истолковал молнию как огромную электрическую искру (рис. 5). Он же положил начало практическому применению приобретенных знаний, сконструировав громоотвод. Оказалось, что заостренный металлический штырь, приподнятый над зданиями, предохраняет от попадания молнии.

Закон Кулона

Построение законченной количественной теории электромагнитных явлений было начато открытием закона взаимодействия неподвижных электрических зарядов. Этот закон экспериментально установил французский ученый Шарль Кулон в 1785 г.

Рис. 6. Весы Кулона.

Кулон изобрел довольно простой прибор — крутильные весы (рис. 6). С помощью этого прибора Кулон измерял силу взаимодействия между двумя заряженными металлическими шариками. Один из них был закреплен неподвижно, а второй — на конце коромысла, прикрепленного к длинной упругой нити. Силу взаимодействия можно было определить по углу закручивания нити, а расстояние между шариками — простой линейкой. Эти измерения показали, что сила взаимодействия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния: $F \sim \frac{1}{r^2}$. Но как она зависит от величины зарядов? Ведь измерять заряд пока еще не умели. Кулон нашел простой и остроумный выход. Он приводил в соприкосновение заряженный шарик с таким же нейтральным. Естественно было предполагать, что заряд шарика разделится пополам. Оказалось, что сила при этом также уменьшается в два раза. Таким образом Кулону удалось показать, что сила взаимодействия пропорциональна произведению зарядов q_1 и q_2 шариков: $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$. Здесь k — коэффициент пропорциональности, который целиком определяется выбором единиц зарядов.

Закон Кулона является фундаментальным законом природы. Все заряженные тела, если только их геометрические размеры много меньше расстояния между ними, взаимодействуют по закону Кулона. Это в равной степени относится как к металлическим шарикам, так и к элементарным частицам. Этот же закон позволяет измерять заряд. Мельчайшая порция электрического заряда — заряд электрона и других элементарных частиц — очень мала. Она теперь измерена очень точно: $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Близкодействие или действие на расстоянии?

Закон Кулона устанавливает силу взаимодействия неподвижных зарядов. Но как осуществляется это взаимодействие? Происходят ли в пространстве, окружающем электрические заряды, какие-либо изменения, какие-либо процессы или же ничего подобного нет? Сам Кулон считал, что заряды непосредственно через пустоту чувствуют присутствие друг друга. Перемещение любого из них мгновенно меняет силу, действующую на соседние заряды, из-за того, что меняются расстояния между ними. Такова сущность представлений о дальнодействии — мгновенном действии на расстоянии через пустоту.

Некоторое время эта точка зрения была господствующей в физике. Она казалась самой простой и позволяла получать важные результаты, согласующиеся с опытом. Однако с самого начала идея, что тело может непосредственно действовать там, где его нет, очень многим представлялась противоречащей самой себе — бессмыслицей. Вот почему английским ученым Майклом Фарадеем была выдвинута *теория близкодействия*, противоположная теории дальнодействия. По этой теории действие тел друг на друга на расстоянии всегда должно объясняться присутствием некоторых промежуточных агентов, передающих действие. Иногда это может быть незаметным. Тот, кому незнакомы свойства воздуха, может подумать, что автомобильный гудок непосредственно действует на наши уши. В действительности же в воздухе происходит процесс распространения звуковой волны и звук от автомашины до нас распространяется в конечное время.

Наличие определенного процесса в пространстве между взаимодействующими телами, процесса, который длится некоторое время,— вот главное, что отличает теорию близкодействия от теории дальнодействия. Все прочие аргументы в пользу той или другой теории не могут считаться решающими.

Согласно Фарадею, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый неподвижный заряд создает в окружающем пространстве нечто, называемое электрическим полем. Поле одного заряда действует на другой заряд. Соотечественник Фарадея — Максвелл, основываясь на идеях

Фарадея, сумел теоретически показать, что воздействие одного электрического заряда на другой распространяется в пространстве с конечной скоростью.

Если передвинуть один заряд, то сила, действующая на другой заряд, изменится не в то же мгновение, а лишь спустя некоторое время (рис. 7). И скорость распространения взаимодействия будет $c = 300\,000$ км/с, т. е. совпадет со скоростью света. Между взаимодействующими зарядами в пустоте действительно происходит некоторый процесс, длящийся конечное время. Это фундаментальный факт, ставящий крест на теории дальнодействия!

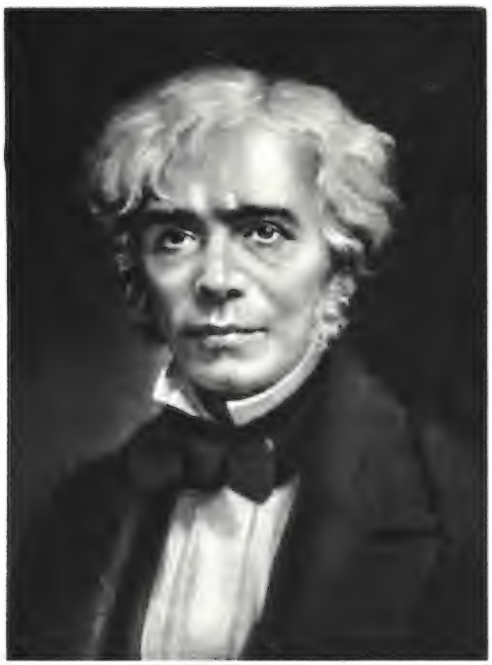
Из-за очень большой скорости распространения электромагнитных взаимодействий обнаружить то, о чем мы сейчас говорили, прямыми опытами не так-то просто. Существование электромагнитного поля, теоретически предсказанное Максвеллом, было экспериментально подтверждено немецким физиком Генрихом Герцем. Сейчас вы можете просто прочитать в газетах, что электромагнитная волна (радиоволна) идет от Земли до космической станции, приближающейся к Венере, более 4 мин.

Неподвижные электрические заряды взаимодействуют друг с другом посредством электрического поля. Но что же представляет собой это поле? Ответить на этот вопрос кратко еще труднее, чем на вопрос, что такое электрический заряд. Мы знаем, что электрическое поле есть на самом деле. Мы можем исследовать его свойства опытным путем. Но мы не воспринимаем его ни одним из наших органов чувств и, самое главное, не можем сказать, из чего это поле состоит.

Дом, например, состоит из кирпичей, плит. Последние, в свою очередь, из молекул, а молекулы — из атомов. Атомы — из элементарных частиц. Элементарные же частицы... ни из чего более простого, чем они сами, не состоят. По крайней мере более простых образований мы сейчас не знаем. Точно так же дело обстоит и с электрическим полем. Ничего более простого, более элементарного, чем поле, мы не знаем. Поэтому на вопрос о том, что такое электрическое поле, ответ может быть только таким: поле материально в том смысле, что оно существует независимо от нас, от наших знаний о нем. И это поле обладает определенными свойствами, которые не позволяют спутать его с чем-либо другим в мире, вокруг нас. Перечень этих свойств и является ответом на вопрос, что же такое электрическое поле.

Свойств этих много, и, надо думать, не все они сейчас известны. Главные свойства таковы: электрическое поле создается электрическими зарядами (неподвижными и движущимися) и обнаруживает себя единственным образом — оно действует на заряды с некоторой силой. По действию поля на заряды не только устанавливается присутствие поля, но и изучается распределение его в пространстве и все его характеристики.

Основная величина, характеризующая электрическое поле, представляет собой силу, действующую на единичный положительный заряд. Она называется *напряженностью* (не путать с напряжением) электрического поля.



Майкл Фарадей (1791—1867)

Английский физик, член Лондонского королевского общества, создатель учения об электромагнитном поле. Самое значительное открытие Фарадея — открытие явления электромагнитной индукции (1831) — явилось крупнейшим вкладом в развитие представлений о природе электричества и способствовало развитию электротехники. Он открыл явления парамагнетизма и диамагнетизма (1845); установил связь между электромагнитными и световыми явлениями, открыв вращение плоскости поляризации света в магнитном поле (1846). Фарадей установил основные законы электролиза, создав, таким образом, основы электрохимии. Являясь основоположником учения об электрическом и магнитном полях, предвидел существование электромагнитных волн.

Рис. 7. При перемещении заряда A сила, действующая на заряд B, изменяется не мгновенно.

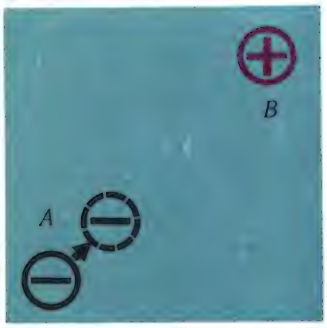


Рис. 8. Силовая линия электрического поля.

Рис. 10. Работа электростатического поля при перемещении электрического заряда из точки A в точку B не зависит от формы пути. Она одинакова на путях *I*, *II* и *III*.

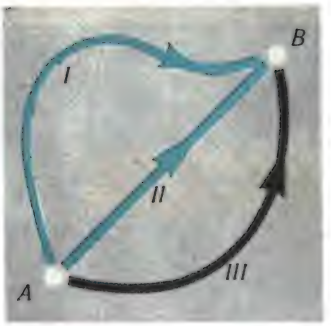
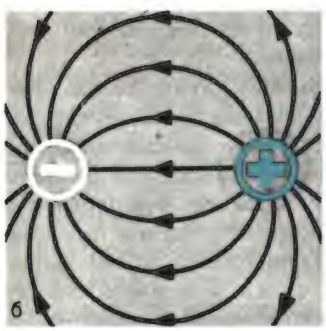
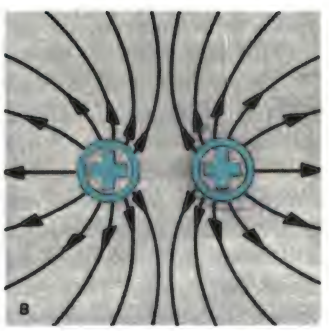


Рис. 11. Работа сил электростатического поля на замкнутом пути равна нулю.

Рис. 9. Примеры силовых линий электрического поля: *а* — силовые линии заряженного шарика направлены по лучам, идущим от центра шарика; *б* — силовые линии двух зарядов противоположного знака (электрического диполя). Линии идут от одного заряда к другому и как бы стягивают их; *в* — силовые линии двух одноименно заряженных шариков. Они как бы отталкиваются друг от друга.





Наглядно распределение поля в пространстве можно изобразить силовыми линиями. *Силовая линия электрического поля* — это линия, касательная к которой в каждой точке дает направление поля (рис. 8). Силовые линии можно сделать видимыми. Для этого достаточно продолговатые кусочки диэлектрика (вещества, не проводящего электрический ток), например хинина, хорошо перемешать в такой вязкой жидкости, как касторка. Тогда вблизи заряженных тел кристаллики хинина выстроятся в цепочки, образуя линии более или менее причудливой формы. На рисунке 9 показано несколько примеров силовых линий электрического поля, полученных таким способом. Чем больше густота линий, тем больше напряженность электрического поля.

Напряжение, или разность потенциалов

Электрическое, точнее электростатическое, поле (т. е. поле, созданное неподвижными зарядами) обладает одним очень важным свойством.

Оказывается, что работа, которую совершают силы электрического поля при перемещении электрического заряда из одной точки в другую, совершенно не зависит от формы пути (рис. 10). На замкнутом пути эта работа просто равна нулю (рис. 11). Поля, обладающие таким свойством, называются *потенциальными*.

Итак, если поле потенциально, то положение двух любых точек A и B в этом поле однозначно определяет работу по перемещению электрического заряда между этими точками. Эта работа называется *напряжением* между точками A и B или *разностью потенциалов*. Так что, зная напряжение в розетке, мы тем самым знаем работу, которую электрическое поле может совершить при перемещении данного заряда от одного отверстия розетки до другого по любому пути и, значит, по любой электрической цепи.

Величину напряжения важно знать потому, что она определяет силу электрического тока в цепи.

Как образуется электрический ток

Для того чтобы возник поток движущихся зарядов, необходимы два условия. Во-первых, присутствие электрически заряженных частиц, или, как мы будем говорить для краткости, электрических зарядов. Причем зарядов свободных. Если положительные за-

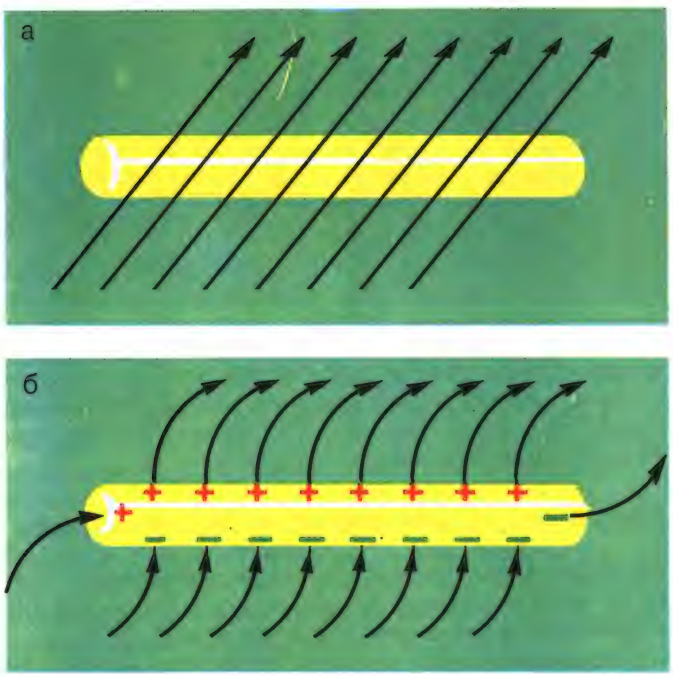


Рис. 12. В первый момент силовые линии электростатического поля пронизывают проводник (*а*). Внутри течет ток. После перераспределения зарядов проводника поле внутри него становится равным нулю (*б*). Ток прекращается.

Рис. 13. Силовые линии электрического поля внутри проводника, по которому течет ток.

ряды связаны с отрицательными в нейтральные системы — атомы, то при их движении никакого электрического тока не возникнет.

Во-вторых, для создания направленного движения зарядов необходима сила, действующая на них в определенном направлении, иначе такое направленное движение не возникнет.

Электрическое поле обычно, но не всегда, как раз и является силой, вызывающей появление электрического тока.

Если тело содержит внутри себя достаточное количество свободных зарядов, способных без особых затруднений перемещаться под действием поля, то оно называется *проводником*. Если же таких зарядов в теле нет, то оно называется *изолятором* (диэлектриком).

Если электрические заряды неподвижны (случай электростатики), то внутри проводника никакого поля нет, иначе заряды двигались бы под воздействием этого поля.

Механизм, приводящий к уничтожению электростатического поля в проводнике, прост. Если внести в электрическое поле кусок проволоки (рис. 12, *а*), то в первый момент поле проникает внутрь проволоки и вызывает перемещение электронов, т. е. ток. Но очень скоро этот ток прекратится. Электрические заряды будут двигаться до тех пор, пока поле внутри проводника не сделается равным нулю, так как переместившиеся заряды создадут свое поле, которое будет направлено против внешнего поля. Все заряды окажутся на поверхности проводника. Заряд внутри проводника будет равен нулю. Ведь иначе ток никогда бы не прекратился и в проводнике все время выделялось бы тепло. Это тепло можно было бы использовать для сооружения вечного двигателя.

Электрическое поле снаружи будет перпендикулярно поверхности проводника (рис. 12, *б*): в противном случае не прекращался бы ток по поверхности проводника.

Посмотрим теперь, в каком случае по проводнику все время течет ток. Ответ очевиден. Нужно, чтобы внутри проводника все время существовало поле.

А чтобы внутри проводника было поле, необходимо поддерживать разность потенциалов на концах проводника. Вот эту задачу и выполняет батарея или генератор электростанции, питающий розетку в вашей комнате. Если напряжение на концах проводника не меняется, то по нему течет постоянный ток, а если меняется, то переменный.

Пусть батарея питает телеграфную линию Москва — Ленинград. Неужели заряды на клеммах батареи способны создать поле протяженностью 600 км? Конечно нет. В момент замыкания цепи начинается довольно хитрый процесс. В первый момент после замыкания цепи электрическое поле появляется только на концах проводников. Оно вызывает смещение электронов вдоль и поперек проволоки. Перемещение электронов вдоль проволоки и представляет собой зарождение интересующего нас тока. Перемещение же поперек проволоки будет продолжаться до тех пор, пока, грубо говоря, электроны не достигнут границы проволоки и не упрутся в нее. Тогда образуются поверхностные заряды. Вот эти-то заряды, а не первичные на клеммах, создадут поле в следующем участке проводника. Там тоже произойдет смещение зарядов вдоль и поперек провода, что приведет к появлению поверхностных зарядов вдоль линии. И так далее, пока вдоль всей проволоки не появится поверхностный заряд. Этот заряд и создает внутри провода электрическое

Рис. 14. Молекулярные токи в намагниченном теле, согласно гипотезе Ампера, ориентированы строго определенным образом.

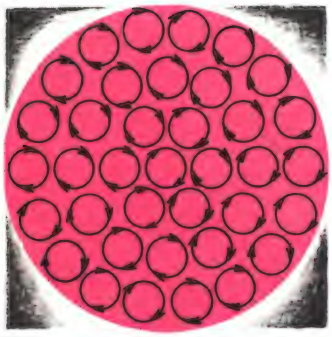


Рис. 15. Силовые линии магнитного поля прямого тока.

поле, строго направленное по его оси (рис. 13). В поперечном направлении поля не будет, так как в этом направлении заряды не могут перемещаться все время.

Весь процесс распространяется вдоль проводника со скоростью, лишь незначительно уступающей скорости света. Сами же электроны перемещаются медленно: примерно со скоростью от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в секунду, в зависимости от характера цепи.

Сила электрического тока и электрическое сопротивление

Постоянное электрическое поле в проводнике действует на заряженные частицы с постоянной силой. Но скорость частиц не нарастает непрерывно, как это должно было бы происходить по закону Ньютона. В металлах электроны сталкиваются с ионами кристаллической решетки. При этом электроны теряют приобретенную за счет поля энергию, передавая ее ионам решетки. Затем поле вновь их разгоняет. Подобные явления происходят и при прохождении тока через жидкости или газы. В результате электроны движутся с некоторой, в среднем постоянной скоростью, тем меньшей, чем больше сопротивление окружающей их среды. Это сопротивление называют *электрическим сопротивлением*. Наряду с напряжением на концах проводника оно определяет заряд, проходящий в 1 с через поперечное сечение проводника, т. е. *силу тока*.

Из всего сказанного должно быть ясно, почему проводник с током нагревается. Сталкиваясь с ионами металлического проводника, электроны передают им свою энергию. Вследствие этого увеличивается интенсивность колебаний ионов около положения равновесия. А чем с большей скоростью колеблются ионы, тем выше температура. Ведь температура тела не что иное, как мера интенсивности хаотического движения частиц, из которых это тело в основном состоит.

Взаимодействие движущихся электрических зарядов

С взаимодействием движущихся зарядов люди столкнулись тысячи лет назад. Но только никто не подозревал, что знакомство состоялось.

Находили странные камни, способные к небольшим «чудесам». Камни на расстоянии заставляли подпрыгивать и притягиваться к ним такие же по виду камушки. Это был магнитный железняк.

До конца XVI в. притяжение магнитов путали с притяжением наэлектризованных тел. Лишь английский ученый Уильям Гильберт понял, что это совсем не одно и то же.

Гильберт первым догадался, что Земля — это огромный магнит и поэтому магнитная стрелка ориентируется определенным образом.

Взаимодействие магнитов внимательно изучил Кулон. Используя тот же метод, что и при исследовании взаимодействия электрических зарядов, он нашел закон взаимодействия полюсов (т. е. концов) длинных магнитов, который оказался подобным уже известному нам закону взаимодействия электрических зарядов.

Невозможность получить магнит с одним полюсом Кулон объяснял так. В природе существуют магнитные заряды противоположного знака, подобные электрическим. Но они не способны перемещаться из одной молекулы в другую, как электрические.

Кулон думал, что открытый им закон взаимодействия «магнитных зарядов» исчерпывает проблему магнетизма. Видимых оснований для сомнений в этом не было. Почему, собственно, в одном случае (электрическое взаимодействие) открытый закон является фундаментальным, а во втором (магнитное взаимодействие) — нет? В действительности все оказалось значительно сложнее. Природа сумела преподнести здесь исследователям один из своих очередных сюрпризов.

Начало настоящему пониманию природы магнетизма положил Эрстед в 1820 г. своим знаменитым опытом по обнаружению поворота магнитной стрелки вблизи проводника с током. Все остальное было сделано французским ученым Ампером.

О ходе мысли этого гениального человека можно судить по его сообщениям Парижской академии наук, следовавшим друг за другом. Сначала под непосредственным впечатлением от наблюдения поворота магнитной стрелки вблизи тока Ампер предположил, что магнетизм Земли вызван токами,

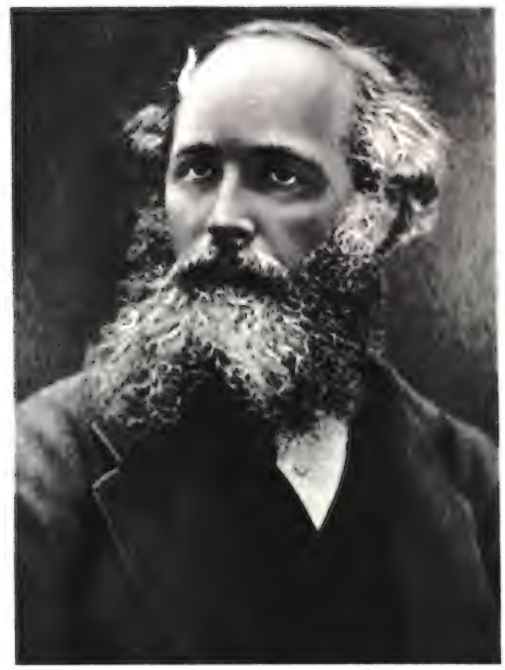
обтекающими Землю в направлении с запада на восток. Главный шаг был сделан. Было понято, что магнитные свойства тела можно объяснить циркулирующим внутри него током. Далее Ампер пришел к общему заключению: магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него. Этот решающий шаг от возможности объяснения магнитных свойств токами к категорическому утверждению, что магнитное взаимодействие — это взаимодействие токов,— свидетельство большой научной смелости Ампера.

Согласно предположению Ампера, внутри атомов и молекул вещества циркулируют элементарные электрические токи. Если эти токи расположены хаотически по отношению друг к другу, то их действие взаимно компенсируется и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы определенным образом, так что их действия складываются (рис. 14).

Там, где Кулон видел неразделимые магнитные заряды (или полюсы) молекул, оказались просто замкнутые электрические токи. Неразделимость магнитных полюсов полностью потеряла свою загадочность. Нет магнитных зарядов, и нечего делить. Магнитные взаимодействия обусловлены не особыми магнитными зарядами, подобными электрическим, а движением электрических зарядов — токами. Впоследствии их существование было доказано прямыми опытами.

Выполнив серию опытов, Ампер открыл закон механического взаимодействия между электрическими токами, решив тем самым проблему магнитного взаимодействия. Тот закон взаимодействия полюсов магнита, который Кулон считал фундаментальным, оказался одним из бесчисленных следствий открытия Ампера.

В обычных условиях силы магнитного взаимодействия частиц гораздо слабее кулоновских. Тем не менее силы взаимодействия токов могут достигать огромной величины. Достаточно вспомнить, что именно эти силы приводят во вращение якорь любого, в том числе и самого большого, электромотора. Более мощные кулоновские силы почти никак не удается использовать в технике. Все дело в том, что мы можем создавать очень большой силы токи, т. е. приводить в движение (правда, сравнительно медленно) громадные количества электронов в проводниках. Создать же очень большие электрические заряды не удается. Большой заряд просто не удержится на теле из-за мощных сил отталкивания. В природе, напротив, роль магнитных взаимодействий по сравнению с электрическими довольно скромна. Сила тока в природе редко достигает большой величины (молния).



Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879)

Английский физик, член Лондонского королевского общества, основоположник теории электромагнетизма. Максвелл дополнил и развил идеи Фарадея и облек их в совершенную математическую форму. Из теории Максвелла следует, что скорость распространения электромагнитных процессов конечна и определяется свойствами среды. Дальнейшее развитие теории привело Максвелла к выводу об электромагнитной теории света. Он ввел в физику методы математической статистики, пользуясь которыми сформулировал в кинетической теории газов закон распределения молекул по скоростям. Выполнил ряд крупных работ по оптике, молекулярной физике, теории упругости, исследовал устойчивость колец Сатурна и показал, что эти кольца не являются сплошными, а образованы множеством мелких спутников.

Внутри атомов и молекул основное значение имеет кулоновское взаимодействие заряженных частиц.

Магнитные силы не могут действовать мгновенно непосредственно через пустое пространство. Подобно тому как в пространстве, окружающем непо-

движные электрические заряды, возникает электрическое поле, в пространстве, окружающем движущиеся заряды (т. е. электрический ток), дополнительно возникает особого рода поле, которое называется *магнитным полем*. Взаимодействие между токами осуществляется посредством магнитного поля. Один ток не непосредственно действует на другой. Первый ток создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на второй, и наоборот.

Ответ на вопрос, что такое магнитное поле, также сводится к перечислению его свойств. Как и в случае электрического поля, иного ответа мы дать не можем. Основное свойство магнитного поля — способность его действовать на движущиеся заряды с определенной силой.

Силовые линии магнитного поля охватывают токи в виде замкнутых линий, не имеющих ни начала, ни конца. (Силовые линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.) Их можно сделать «видимыми» с помощью железных опилок на гладкой стеклянной пластинке. Если слегка постукивать по пластинке для уменьшения сил трения, то опилки будут выстраиваться вдоль силовых линий (рис. 15).

Максвеллом на основе открытий Кулона и Ампера были сформулированы точные законы, определяющие напряженность электрического и магнитного полей в зависимости от распределения в пространстве зарядов и их скоростей.

Взаимная связь электрических и магнитных полей

Первый и самый важный шаг в обнаружении новых свойств электрических и магнитных полей был сделан Майклом Фарадеем в 1831 г.

Электрический ток, рассуждал Фарадей, способен намагнитить кусок железа. Для этого достаточно положить его внутрь катушки с током. Не может ли магнит, в свою очередь, вызвать появление электрического тока? Фарадею удалось разрешить эту задачу и открыть принцип, лежащий в основе устройства генераторов электростанций во всем мире.

Открытие пришло не сразу, так как трудно было додуматься до главного: только движущийся магнит или переменный ток способны возбудить электрический ток в катушке.

Первоначально Фарадей обнаружил явление *электромагнитной индукции* («индукция» значит «наведение») с помощью двух изолированных друг от друга проволочных спиралей, намотанных на деревянную катушку. Одна спираль была присоединена к большой гальванической батарее, а другая — к чувствительному регистратору тока — *гальванометру*. При замыкании и размыкании цепи первой спирали наблюдалось слабое отклонение стрелки гальванометра в цепи второй спирали. Через полтора месяца после первого успешного эксперимента Фарадей обнаружил индукционный ток в катушке в момент вдвигания или выдвигания магнита.

Рис. 16. При изменении числа силовых линий магнитного поля, пронизывающих площадь, ограниченную проводящим контуром, в нем возникает индукционный ток (магнитное поле нарастает).

Во всех этих опытах, внешне выглядевших поразному, Фарадей уловил общую суть. В замкнутом проводящем контуре возникает электрический ток при изменении магнитного поля, пронизывающего поверхность, ограниченную этим контуром (рис. 16).

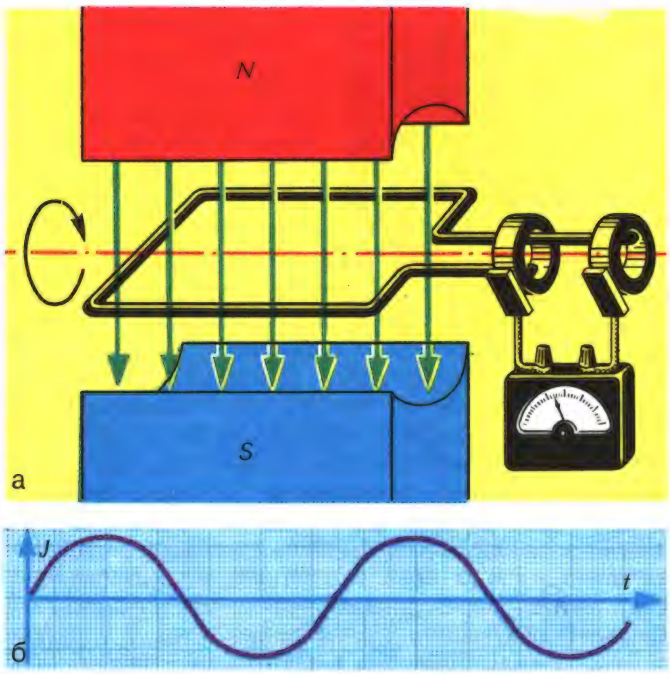
Причина изменения магнитного поля не имеет никакого значения. Это может быть и изменение силы тока в соседней катушке, и сближение катушек, и движение магнита.

Возникший в катушке индукционный ток, конечно же, будет взаимодействовать с теми токами, которые его породили. Русский ученый Э. Х. Ленц сформулировал общее правило, определяющее направление индукционного тока: этот ток должен отталкивать породивший его первичный ток в момент, когда магнитное поле этого тока, пронизывающее контур с индукционным током, нарастает. Напротив, если это поле убывает, то индукционный ток притягивается к первичному.

Если бы это было не так, то наш мир был бы катастрофически неустойчивым. В нем не сохранялась бы энергия. Действительно, подтолкнув слегка магнит к катушке, мы вызвали бы в ней ток, притягивающий магнит. В результате ток увеличивал бы скорость магнита и благодаря этому увеличивал сам себя. Энергия в системе нарастала бы, что противоречит закону сохранения энергии.

Э. Х. Ленц был первым, кто понял связь между сохранением энергии и направлением индукционного тока.

Рис. 17. Модель генератора тока (*а*). Зависимость силы тока от времени в цепи переменного тока (*б*).



Явление электромагнитной индукции позволило сконструировать генераторы, преобразующие механическую энергию в энергию электрического тока.

Пусть прямоугольная проволочная рамка вращается в однородном магнитном поле (рис. 17, *а*). Число силовых линий, пронизывающих рамку, непрерывно меняется от максимального значения, когда она расположена поперек поля, до нуля, когда силовые линии скользят вдоль рамки. В результате в цепи рамки появляется переменный ток (рис. 17, *б*). В обычной электрической сети ток меняет свое направление 50 раз в секунду.

Индукционный ток взаимодействует с внешним магнитным полем и, в соответствии с правилом Ленца, тормозит вращение рамки. Только поэтому нужно для вращения рамки совершать работу, тем большую, чем больше сила тока в цепи. За счет данной работы и возникает в конечном счете индукционный ток. Реальный генератор устроен, конечно, гораздо сложнее, чем простая рамка, вращающаяся в постоянном магнитном поле. Во-первых, вместо одной рамки имеется сложная обмотка из множества рамок на железном сердечнике — якорь. Во-вторых, магнитное поле, в котором вращается якорь, создает электромагнит, питаемый тем самым током, который вырабатывается генератором. Кроме того, имеется много технических ухищрений, позволяющих сделать к.п.д. генератора близким к 100%.

Вильгельм Конрад Рентген (1845—1923)

Немецкий физик, лауреат Нобелевской премии (1901). В 1895 г. открыл особого рода излучение — рентгеновские лучи, или Х-лучи. Рентгеновские лучи и радиоактивность, обнаруженная вскоре после открытия рентгеновских лучей, привели к созданию физики атома. Рентгеновские лучи сразу же получили широкое применение в медицине. Рентген был блестящим экспериментатором. До нашего времени сохранили значение его рекордные по точности измерения отношения теплоемкостей газов, вязкости и диэлектрической проницаемости ряда жидкостей. Рентгену принадлежат классические исследования пьезоэлектрических и пироэлектрических свойств кристаллов, опыты по измерению магнитного поля, создаваемого движущимися зарядами на изолированных друг от друга проводниках.

Что вызывает перемещение электронов в якоре генератора?

Что же вызывает смещение электронов в проводниках якоря генератора? Смещение, которое создает напряжение на его зажимах и приводит в движение электроны во всей цепи на расстояниях в сотни и даже тысячи километров от генератора.

В проводнике есть свободные электроны. Пока рамка неподвижна, неподвижны и они. (В действительности это не совсем так. И в неподвижном проводнике электроны совершают беспорядочное тепловое движение. Но средняя скорость такого движения равна нулю, так как число электронов, движущихся в одном направлении, равно числу электронов, движущихся в противоположном направлении. Средняя сила электрического тока соответственно равна нулю, как если бы электроны покоились.) Но как только проводники рамки приходят в движение, содержащиеся в них электроны сразу начинают двигаться. На движущиеся заряды, согласно закону Ампера, будет действовать сила со стороны магнитного поля. Именно эта сила и приводит электроны в движение.

Работу сил неэлектростатического происхождения (в данном случае магнитных) по перемещению единичного положительного заряда вдоль проводника называют *электродвижущей силой* в этом проводнике (сокращенно э.д.с.). В якоре генератора возникает э.д.с. индукции, что в конечном счете приводит к перемещению зарядов во всей цепи с помощью того механизма образования поверхностных зарядов, о котором было рассказано.

Если проводник движется в магнитном поле, то индукционный ток возбуждает сила, действующая на свободные заряды со стороны магнитного поля. А как понять причину возникновения индукционного тока, а значит и э.д.с. индукции, если проводник неподвижен, как это было в первом опыте Фарадея?

Вихревое электрическое поле

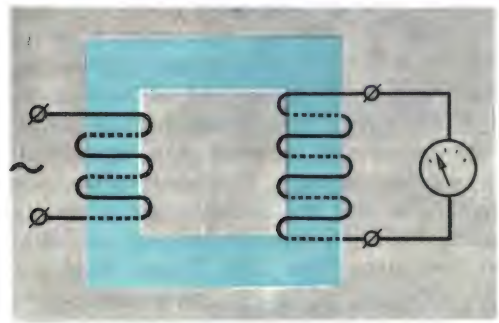
Перед нами обыкновенный трансформатор, состоящий из двух катушек на общем железном сердечнике (рис. 18, 19).

Трансформатор применяется для того, чтобы повысить или понизить напряжение переменного тока. Включив первичную обмотку трансформатора в сеть, мы немедленно получим ток в соседней вторичной обмотке, если только она замкнута. Электроны этой обмотки придут в движение. Но какие же силы вызывают их движение?

Магнитное поле этого сделать не может, так как электроны неподвижны. Кроме магнитного поля на электроны может действовать поле электрическое. Причем последнее действует на неподвижные заряды. Однако то поле (электростатическое), о котором шла речь, создается непосредственно электрическими зарядами. В трансформаторе же индукционный ток появляется под действием переменного магнитного поля. Уж не появляются ли здесь какие-то новые, особые поля?

Рис. 18. Трансформаторы.

Рис. 19. Схема трансформатора.



Спешить с подобными заключениями, усложняющими картину мира, нет нужды. Ведь пока мы знаем основные свойства постоянных (не изменяющихся со временем) электрических и магнитных полей. А что если у переменных полей есть новые свойства? Тогда для объяснения появления индукционного тока в неподвижном проводнике остается единственная возможность. Электроны во вторичной обмотке трансформатора приходят в движение под действием электрического поля, но это электрическое поле порождается не зарядами, а переменным магнитным полем. Таким образом утверждается существование нового фундаментального свойства электромагнитного поля: переменное магнитное поле порождает в пространстве вокруг себя электрическое поле.

Итак, в явлении электромагнитной индукции главное — это рождение переменным магнитным полем в пустом пространстве электрического поля. Присутствие проводника — факт второстепенный. Проводник с его запасом свободных электронов —

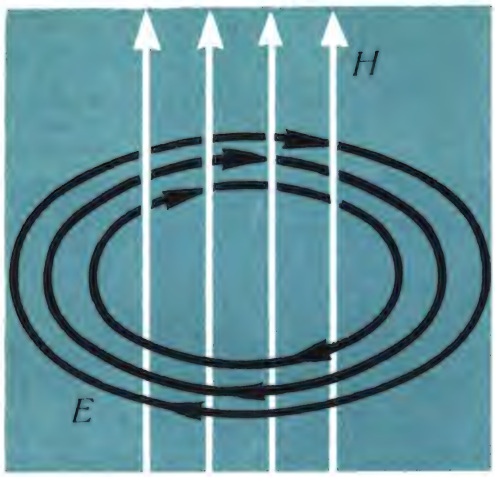


Рис. 20. Силовые линии вихревого электрического поля E, возникающего при изменении магнитного поля H. Магнитное поле нарастает.

просто регистратор возникающего электрического поля. Оно приводит в движение электроны и тем самым обнаруживает себя.

Истинный смысл закона электромагнитной индукции был найден английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом. Он же придал этому закону ту простую и ясную математическую форму, которой сейчас пользуется весь мир.

Возникающее при изменении магнитного поля электрическое поле имеет совсем другую структуру, чем электростатическое. Оно создается не зарядами, а возникает под влиянием магнитного поля непосредственно в пространстве (пустом или заполненном веществом — безразлично). Соответственно, его силовые линии ни на чем не начинаются и ни на чем не кончаются. Они всегда замкнуты подобно линиям магнитного поля (рис. 20). Такое поле называется *вихревым*. Оно не имеет потенциального характера. При перемещении заряда вдоль замкнутой силовой линии электрического поля совершается работа, отличная от нуля. Она и представляет собой э.д.с. индукции в обмотке трансформатора.

Может быть, у вас возникнет вопрос: а каков же «механизм» порождения электрического поля магнитным? Нельзя ли разъяснить в деталях, как и за счет чего осуществляется связь электрического и магнитного полей в природе?

Увы, нельзя. Закон электромагнитной индукции — это основной, или, можно сказать, первичный, закон природы. Действием его можно объяснить массу явлений, но сам он остается необъяснимым просто по той причине, что более глубоких законов, из которых он бы вытекал как следствие, мы не знаем. Такова судьба всех фундаментальных законов: закона всемирного тяготения, законов Кулона, Ампера.

Ток смещения

Порождение электрического поля магнитным Максвелл усмотрел в явлении электромагнитной индукции. Следующий, и последний, шаг в открытии основных свойств электромагнитного поля был сделан им уже без какой-либо помощи эксперимента.

Магнитное поле рождает электрическое. Не может ли существовать обратный процесс, когда переменное электрическое поле, в свою очередь, порождает магнитное? Максвелл допустил, что такого рода процесс должен реально происходить в природе. Кроме соображений симметрии свойств полей для этого было еще одно важное основание. На строгом языке математики оно выглядело весьма убедительно. Замкнутость силовых линий магнитного поля требует (показать это можно только с помощью сложной математики) замкнутости электрического тока, который порождает магнитное поле.

Однако обычный электрический ток, или ток проводимости, как его часто называют, не всегда замкнут. Пусть в цепь включен конденсатор: две пластины на небольшом расстоянии друг от друга (рис. 21). Если приложенное напряжение является переменным, то конденсатор будет попеременно заряжаться и разряжаться и в цепи пойдет ток, хотя никакого движения зарядов между пластинками конденсатора нет.

В пространстве между пластинками изменяющийся электрический заряд пластин создает переменное электрическое поле. Вот это поле Максвелл и назвал *током смещения*. Добавка «смещение» к слову «ток», с одной стороны, говорит нам, что это не обычный ток, а нечто специфическое, а с другой стороны, напоминает о том отдаленном времени, когда с изменением электрического поля в пустоте связывалось механическое смещение частиц гипотетической среды — мирового эфира, заполняющего все пространство. Гипотеза Максвелла позволила рассматривать ток в цепи как замкнутый: между пластинками ток смещения продолжает ток проводимости. Тем самым ликвидировалось противоречие между замкнутостью силовых линий магнитного поля и незамкнутостью тока проводимости в данном частном случае. Но суть гипотезы состояла, конечно, не в придумывании нового термина. Переменное электрическое поле (по Максвеллу — ток смещения) порождает магнитное поле по точно таким же законам, как и обычный ток проводимости. Причем Максвелл не только высказал данную гипотезу, но тут же нашел точный количественный закон, определяющий напряженность магнитного поля в зависимости от скорости изменения поля электрического.

Справедливость этого утверждения Максвелла была доказана экспериментально лишь спустя почти 10 лет после его смерти, когда были обнаружены электромагнитные волны. Электромагнитная ин-

Рис. 21. Конденсатор в цепи переменного тока. Ток проводимости обрывается на пластинах, между которыми переменное электрическое поле.

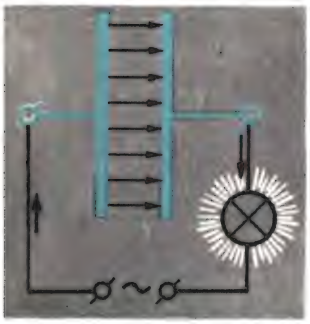
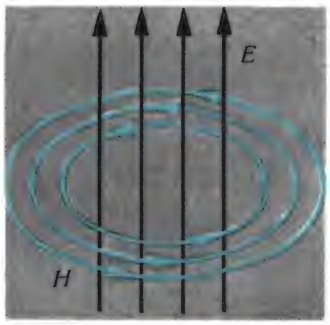


Рис. 22. Силовые линии магнитного поля H, возникающие при изменении электрического поля E. Электрическое поле растет.



дукция и ток смещения полностью определяют возможность существования электромагнитных волн. Таким образом, еще одно фундаментальное, не подлежащее разложению на более элементарные, свойство электромагнитного поля было обнаружено. Переменное электрическое поле порождает в пустом пространстве магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями. Причем в растущем электрическом поле силовые линии магнитного поля образуют правый винт с полем (рис. 22), в отличие от левого винта для поля в явлении электромагнитной индукции (рис. 20). Глубокий смысл этого мы выясним немного позднее.

Сама возможность появления гипотезы Максвелла возникла лишь после объяснения электромагнитной индукции на основе представлений о поле. В то время когда большинство известных ученых не придавало самому понятию поля серьезного значения и когда до момента экспериментального доказательства его существования оставалось более десяти лет, Максвелл смело положил в основу количественной теории представление о поле. И далее, идя шаг за шагом, опираясь на установленные опытным путем закономерности, он пришел к конечной цели. Предположение о существовании токов смещения было последним важным звеном. Здесь Максвелл наделил предполагаемый объект (поле) новым предполагаемым свойством, не имея на то, в отличие от предыдущих случаев, прямых экспериментальных указаний.

Леонид Исаакович Мандельштам (1879—1944)

Советский физик, академик, лауреат Государственной премии СССР. Научные труды Мандельштама относятся к оптике, теории колебаний и радиофизике. Совместно с Г. С. Ландсбергом (независимо от индийского физика Ч. Рамана) открыл комбинационное рассеяние света в кристаллах. Один из создателей теории нелинейных колебаний. Совместно с Н. Д. Папалекси предложил новый метод возбуждения электрических колебаний, так называемую параметрическую генерацию; разработал интерференционный метод измерения скорости распространения радиоволн и применил его к измерению больших расстояний. Мандельштаму принадлежат работы по статистической и квантовой физике и теории относительности.

Электромагнитное поле

После открытия взаимосвязи электрического и магнитного полей стал очевидным важнейший факт: эти поля не суть нечто обособленное, независимое одно от другого. Они — проявление единого целого, которое может быть названо *электромагнитным полем.*

Пусть в некоторой области пространства есть неоднородное электрическое поле, созданное каким-либо зарядом, покоящимся относительно Земли. Магнитного поля вокруг заряда нет. Но так будет только по отношению к Земле (в системе отсчета, неподвижной относительно Земли, как говорят физики). Для движущегося наблюдателя неоднородное, но не меняющееся со временем поле будет представляться уже переменным. А переменное поле рождает магнитное, и движущийся наблюдатель может обнаружить магнитное поле наряду с электрическим.

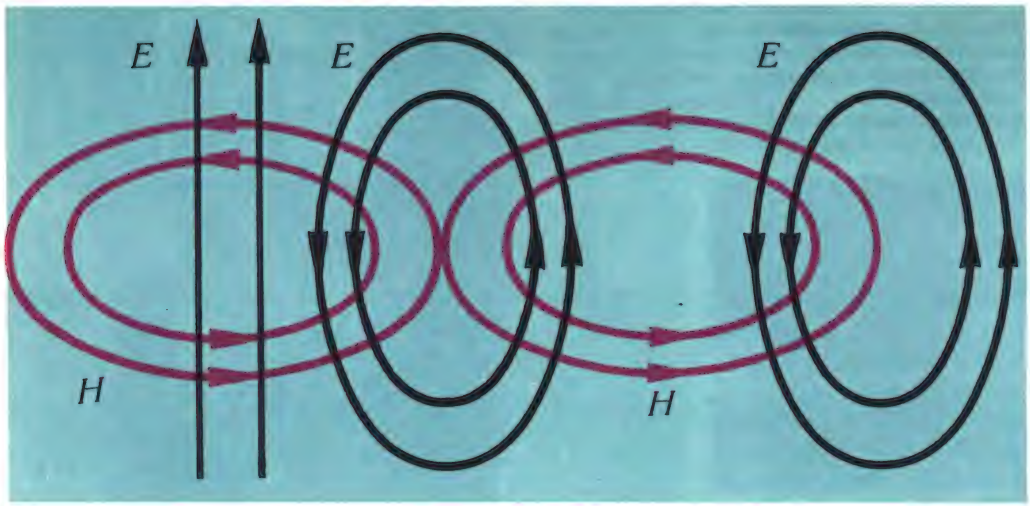


Рис. 23. Схема «механизма» передачи электромагнитных взаимодействий.

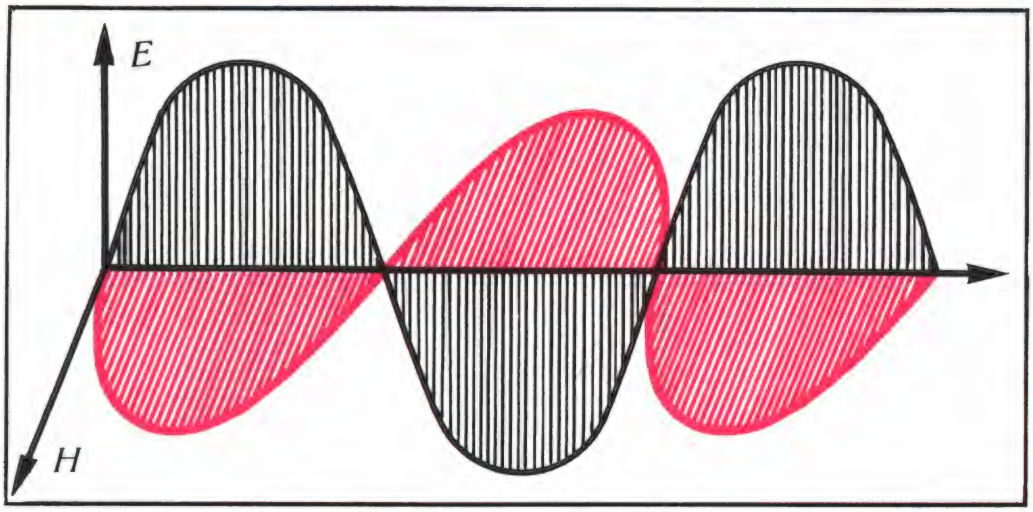


Рис. 24. Бегущая электромагнитная волна.

Точно так же лежащий на Земле магнит создает только магнитное поле. Но движущийся относительно него наблюдатель обнаруживает и электрическое поле в полном соответствии с явлением электромагнитной индукции.

Поэтому утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое (или магнитное) поле, само по себе лишено смысла. Нужно добавить: по отношению к определенному наблюдателю, по отношению к определенной системе отсчета. Среди бесчисленных следствий, вытекающих из теории электромагнитного поля Максвелла, содержится важный результат: конечность скорости распространения электромагнитных взаимодействий.

Согласно теории дальнодействия, сила, действующая на электрический заряд, сразу же изменится, если соседний заряд сдвинуть с места. В действительности дело обстоит совершенно иначе.

Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле (ток смещения) порождает переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, рождает переменное электрическое поле; электрическое, в свою очередь,— магнитное и т. д. (рис. 23). Причем возникающие вихри магнитного (или электрического) поля охватывают новые и новые области пространства. Все происходит по тем правилам определения направления полей, о которых мы уже говорили раньше. Если бы поля были направлены иначе, то это привело бы к нарушению закона сохранения энергии. Созданное в пространстве магнитное поле нарастало бы со временем, распространяясь во все стороны.

Перемещение заряда вызывает, таким образом, к жизни дремавшие до этого способности электромагнитного поля, и в результате всплеск этого поля, распространяясь, охватывает все большие и большие области окружающего пространства. Наконец этот всплеск достигает второго заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы. Но произойдет это не в тот момент, когда сместится первый заряд. Процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был раскрыт Максвеллом, протекает с конечной, хотя и очень большой, скоростью; Максвелл чисто математически показал, что эта скорость равна скорости света в пустоте: 300 000 км/с.

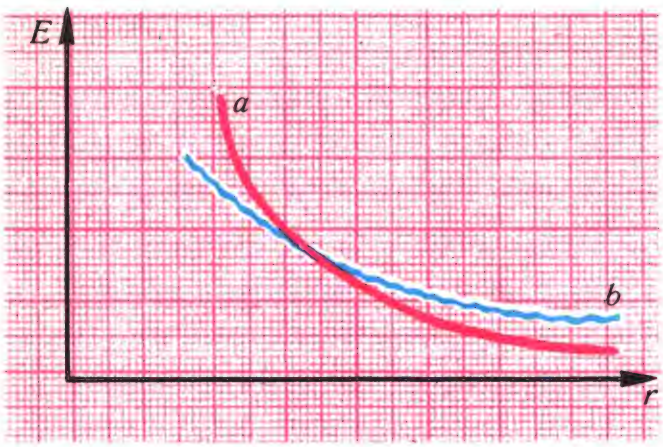


Рис. 25. Убывание электрического поля с увеличением расстояния от источника в случае статического поля (*a*) и поля электромагнитной волны (*b*).

Электромагнитные волны

Представим себе, что электрический заряд не просто сместился из одной точки в другую, а приведен в быстрое колебание так, что он движется подобно грузу, подвешенному на пружинке, но только намного быстрее. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнет периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а последнее, в свою очередь, вызывает появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д.

В окружающем заряд пространстве, захватывая все большие и большие области, возникает система периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. «Моментальный снимок» такой системы приведен на рисунке 24. Образуется то, что мы называем электромагнитной волной, бегущей со скоростью света во все стороны от колеблющегося заряда. В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут ее колебания полей.

То, что скорость электромагнитных волн равна скорости света, навело Максвелла на мысль об электромагнитной природе света.

Впервые экспериментально обнаружил электромагнитные волны немецкий физик Генрих Герц в 1888 г. А. С. Попов применил их для радиосвязи в 1895 г.

Посредством электромагнитных волн осуществляется совершенно новый тип взаимодействия между электрическими зарядами. Излучаются волны колеблющимися электрическими зарядами, т. е. зарядами, движущимися с ускорением. Ускорение — главное условие порождения электромагнитных волн. Электромагнитное поле излучается не только при колебаниях заряда, но и при любом резком изменении его скорости.

Чем с большей частотой колеблется заряд, тем большее ускорение он имеет и тем соответственно более интенсивны излучаемые им волны. При увеличении частоты колебаний всего лишь в два раза излучаемая энергия возрастает в 16 раз! Поэтому в антеннах радиостанций возбуждаются колебания с частотой в сотни мегагерц. Промышленный же переменный ток практически ничего не излучает.

Самым важным фактором взаимодействия посредством электромагнитных волн является медленность убывания напряженностей полей в волне с увеличением расстояния от источника. Электростатические силы и силы взаимодействия токов убывают обратно пропорционально квадрату расстояния. Убывание же напряженности полей в электромагнитной волне с увеличением расстояния обратно пропорционально самому расстоянию (рис. 25)!

Это крайне медленное убывание. Все другие силы в природе уменьшаются с увеличением расстояния гораздо быстрее. Здесь же, как показывают вычисления, за счет последовательного возбуждения полей друг другом они оказываются способными уходить от источника очень далеко. Вот почему поля даже сравнительно маломощной радиостанции могут быть обнаружены на расстояниях в миллионы километров (космическая радиосвязь), в то время как статические поля на таких расстояниях никак не сказываются. По той же причине мы видим звездные скопления, удаленные от нас на невообразимые расстояния, которые свет преодолевает за миллиарды лет! Многое еще можно было бы рассказать об электрических и магнитных свойствах тел, об электромагнитной природе таких обычных сил, как упругость, трение и т. д. В этой статье шла речь о самом главном — об основных законах электромагнитных взаимодействий.

Удивительный мир твердых тел

Ледяная сосулька и клинок сабли, железнодорожный рельс и кристалл рубинового лазера, обломок кирпича и драгоценный бриллиант, корпус космического корабля и раскаленная нить электролампы — все это твердые тела. Что между ними общего и чем они отличаются друг от друга — в этом помогает разобраться физика твердого тела, многообразная и увлекательная наука.

Она изучает металлы, полупроводники, диэлектрики, сегнетоэлектрики, ферромагнетики, ферриты, сверхпроводники и другие удивительные вещества. Как сделать сверхпрочную сталь, как получить сверхчистые кристаллы полупроводника, как создать сверхсильные магнитные поля или сверхвысокие давления — эти и многие другие вопросы волнуют ученых, разгадывающих загадки твердого тела.

Этих загадок так много, что физика твердого тела разделилась на несколько самостоятельных наук — ведь нельзя объять необъятное. Одни ученые изучают теорию твердого тела, т. е. расположение в нем атомов, ионов и электронов и их взаимодействия. Разнообразие этих взаимодействий и определяет все разнообразие свойств твердых тел. Другие ученые занимаются выращиванием и изучением свойств кристаллов — ведь большинство твердых тел представляют собой поликристаллы, т. е. скопления огромного количества мелких кристалликов. Третьи работают над вопросами прочности и пластичности, имеющими важное значение для промышленности: прочность определяет долговечность и надежность деталей, а пластичность связана со сложностью механической обработки этих деталей. Четвертая большая группа ученых изучает физику полупроводников — крупнейший раздел физики твердого тела, давно уже превратившийся в самостоятельную науку. Многочисленные группы ученых и инженеров занимаются физикой магнитных явлений, поведением вещества при высоких давлениях, изучают сверхпроводимость, т. е. свойства твердых тел при сверхнизких температурах. Самостоятельными разделами физики твердого тела являются разработка методов оптического спектрального анализа, радиоспектроскопии и других спектроскопических методов исследования твердых тел; рентгенография кристаллов, т. е. изучение дифракции (см. ст. «Свет») рентгеновских лучей при прохождении через кристалл, что позволяет судить о закономерностях расположения атомов в кристаллах; радиационное материаловедение, изучающее изменение механических и других свойств тел под воздействием нейтронного излучения атомных реакторов. Очень полезным для изучения твердых тел оказалось введение представления о квантах звука — *фононах*. Вообще исследование распространения и поглощения ультразвука в твердых телах дает богатую информацию об их структуре и свойствах... Всего и не перечислишь.

Достижения физики твердого тела позволяют создавать новые вещества, улучшать уже существующие, находить новые области применения твердых тел. Ведь свойства твердых тел широко используются в науке и технике. В акустике не обойтись без *пьезокристаллов*. В оптике твердые тела используют для изготовления линз, призм и других элементов оптических установок. Новые конструкционные материалы, созданные на основе изучения и улучшения механических свойств и жаропрочности твердых тел, идут на изготовление корпусов космических кораблей. Квантовая электроника широко использует в лазерах кристаллы рубина, сапфира и других веществ. Выращивание кристаллов превратилось в целую отрасль промышленности. Осваивается и выращивание ювелирных кристаллов, по красоте своей не уступающих естественным драгоценным камням. Огромные возможности для науки и техники открыло создание полупроводниковых материалов и приборов. Не меньшие возможности связаны с использованием магнитных свойств твердых тел. Магнитные материалы применяются повсюду — от магнитных лент в обычных магнитофонах до запоминающих устройств электронных вычислительных машин. Искусственные алмазы и другие сверхтвердые материалы, созданные при высоких давлениях, позволяют во многих случаях отказаться от дорогих естественных алмазов.

С физикой твердого тела вы встретитесь в других статьях тома: с поведением твердых тел при сверхвысоких давлениях — в статье «Вещество при высоких давлениях», со сверхпроводниками — в статье «На подступах к абсолютному нулю», со спектроскопическими методами анализа — в статьях «Свет» и «Радиофизика», с радиационным материаловедением — в статье «Атомный реактор».

Мы расскажем о важнейших разделах физики твердого тела: о кристаллическом строении твердых тел и их электронной структуре; о свойствах и применениях полупроводников; о физике магнитных явлений; о закономерностях распространения звуковых волн в твердых телах.

Кристаллы

Холодное зимнее небо роняет снежинки. Они невесомо спускаются на нашу ладонь, тают и падают с руки прозрачными шариками — каплями воды. Если взглянуть на снежинку через лупу, обнаружится сказочное явление: шестилучевая звездочка, и каждый луч ее состоит из шестигранных столбиков (гексагональных призм). Это кристаллы льда — твердой воды.

Твердое состояние вещества — кристаллическое. В кристаллах с первого взгляда поражает их правильная форма, у каждого вещества своя. Твердое тело может быть монокристаллическим, т. е. состоять из одного-единственного кристалла, или поликристаллическим, т. е. состоять из многих кристаллов, иной раз очень мелких, например в тысячную долю миллиметра (1 мкм).

Кристаллы имеют форму многогранников с плоскими гранями (рис. 1). Кристаллы поваренной соли (NaCl) образуют кубы. Кристаллы алмаза — октаэдры, восьмигранники. Кристаллы полудрагоценного камня берилла — гексагональные призмы, торцы которых покрыты тончайшим узором. Не каждый ювелир смог бы воспроизвести такой узор! В кристаллографии приняты названия, производные от греческих слов: «эдра» — грань, «гонос» — угол; октаэдр — восьмигранник, гексагон — шестиугольник.

Симметрия. Основные внешние признаки твердого тела — его правильная «от природы» кристаллическая форма и плоскогранность. Правильность формы выражена в его симметрии, т. е. в свойстве совмещаться в разных положениях с положением исходным. Для наглядности процесс совмещения, именуемый операцией симметрии, осуществляется с помощью элементов симметрии.

Если кубический кристалл NaCl повернуть на 90° вокруг оси, проходящей через центры противоположных граней, кристалл совместится с исходным положением. При полном повороте вокруг оси на 360° кристалл NaCl совместится с исходным положением четырежды (рис. 2). Поэтому кубический кристалл NaCl обладает тремя осями симметрии *четвертого порядка* (они показаны на рисунке), а также четырьмя осями *третьего порядка* (объемные диагонали куба) и шестью осями *второго порядка* (они проходят через центры противоположных ребер).

На рисунке 3 мы видим пример другой, *зеркальной, симметрии*: левая половина рисунка совмещается с правой, как предмет со своим отражением в зеркале. Вместо оси симметрии здесь существует другой элемент симметрии — плоскость симметрии. На рисунке 3 плоскость симметрии пересекает плоскость рисунка по линии, делящей рисунок вертикально. Плоскости симметрии есть и у кристалла NaCl.

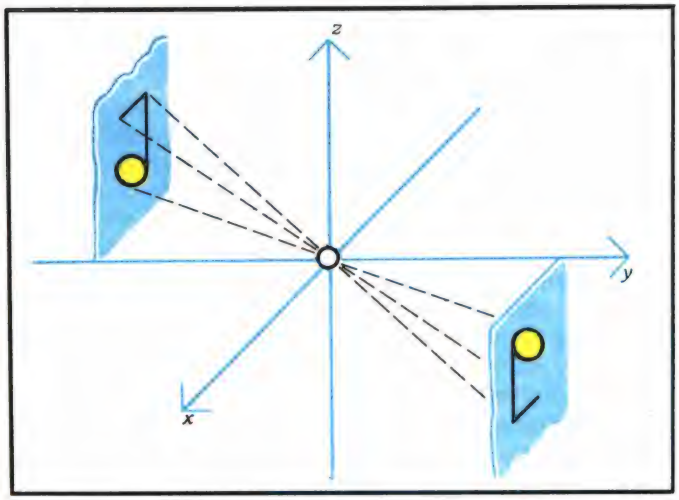
В некоторых кристаллах наблюдается еще один вид элементов симметрии — центр инверсии, или *центр симметрии*. Он делит пополам прямые, кото-

Рис. 1. У кристаллов различных веществ различная геометрическая форма. *Слева направо:* у поваренной соли — куб; у алмаза — октаэдр; у берилла — гексагональная призма.

Рис. 2. У кубического кристалла поваренной соли три взаимно перпендикулярные оси симметрии четвертого порядка, четыре оси третьего порядка и шесть осей второго порядка.

Рис. 3. Плоскость симметрии (зеркало) перпендикулярна поверхности кадра и делит ее пополам. Отражение в зеркале симметрично с фигурой девочки, стоящей на палубе.

Рис. 4. Центр инверсии (симметрии).



рые соединяют противоположные, равные, параллельные, но обратно направленные (антисимметричные) части фигуры (рис. 4). На рисунке 5 показан кристалл анортита, имеющий только центр симметрии. Для наглядности две антисимметричные грани даны голубым цветом. (Центр симметрии есть и в кристалле NaCl.) Понятие антисимметричных фигур широко используется в физике. Ниже мы встретимся с антисимметричными электронами (принцип Паули).

Монокристаллы и поликристаллические вещества. В производстве меди или стали расплав охлаждают быстро, и отдельные кристаллики не успевают подрасти. Получается поликристаллическое твердое тело. Металлические предметы, окружающие нас в быту, от вилки до подъемного крана, состоят из поликристаллических веществ. Кристаллическую структуру такого вещества можно увидеть через микроскоп.

Поликристаллические вещества, как мы знаем, состоят из мелких монокристаллов. Но не следует думать, что монокристаллы всегда мелки. В природе нередко встречаются крупные монокристаллы. Они вырастают в результате длительных процессов, протекающих в земной коре. Например, монокристаллы кварца, химический состав которого тот же, что и у речного песка (SiO_2), вырастают до десятков сантиметров в поперечнике. В Ленинградском горном институте хранятся монокристаллы кварца, найденные на Урале и на Украине. Высота одного из них 85 см, высота другого 83 см. Массы их 800 и 500 кг.

В связи с развитием новой техники появилась потребность как в мелких, так и в крупных монокристаллах германия, кремния и других веществ. Иногда оказываются нужными кристаллические иглы, нити и даже тончайшие пленки. Все эти «капризы» приборостроительной промышленности удовлетворяются научными лабораториями и специальными заводами.

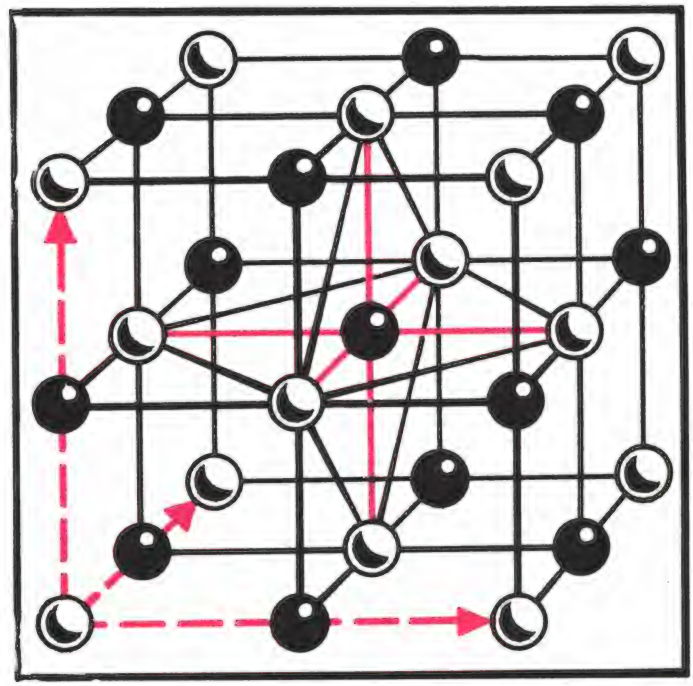
Анизотропия. Многие свойства монокристаллов зависят от направления, в котором эти свойства измеряются. Зависимость физических свойств от направления называется *анизотропией*. Например, теплопроводность кристалла, измеренная в различных направлениях, может оказаться неодинаковой. Она будет одинаковой лишь в параллельных и симметричных направлениях. То же можно сказать об *электропроводности, твердости, прочности* и других свойствах. Иначе говоря, симметрия внешней формы сопровождается в монокристаллах симметрией физических свойств.

Анизотропия проявляется весьма наглядно. Из монокристаллов кварца, к примеру, изготовляют пьезоэлектрические пластинки (см. ст. «Звук»). Вырезать их нужно под строго определенными углами к осям симметрии, к граням и ребрам кристалла и для разных назначений пластинки — под разными углами. Ошибся в углах среза — получится бракованный прибор.

Симметрия внешней формы и симметрия физических свойств, на первый взгляд кажущиеся чудом, вызваны симметрией внутреннего строения кристалла, т. е. расположением атомов в твердом теле.

Рис. 5. Кристалл анортита.

Рис. 6. У каждого атома в кристалле поваренной соли шесть соседей, они расположены по трем взаимно перпендикулярным осям.



Элементарная ячейка кристаллической решетки. Исследование методами рентгеновского анализа показало, что правильная форма кристаллов (например, NaCl) вызвана правильным расположением в пространстве ионов (в нашем примере Na^+ и Cl^-), или атомов; расстояния между атомами в кристалле строго равны в каждом данном направлении, как, например, между центрами квадратов шахматной доски. Эта особенность определяется понятием «дальний порядок».

Наименьшее количество атомов кристалла, сохраняющее при уменьшении его размеров присущий данному кристаллу дальний порядок, называется *элементарной ячейкой*. На рисунке 6 показана элементарная ячейка кристалла NaCl. Длина ребра ее равна 0,563 нм, расстояние между центрами ионов Na^+ (белые) и Cl^- (черные) равно 0,2815 нм.

Из элементарных ячеек слагается кристаллическая решетка твердого тела, состоящая из огромного количества атомов. Атомы, или ионы, образуют узлы кристаллической решетки. Промежутки между узлами, «незанятые позиции», называют *междуузлиями*.

В кристаллической решетке NaCl ионы Na^+ и Cl^- образуют соответствующие подрешетки натрия и хлора, как бы вставленные друг в друга. На рисунках изображены также структуры: меди (рис. 7), графита (рис. 8) и алмаза (рис. 9). У каждого атома в решетке меди 12 соседей, в решетке NaCl — 6 соседей, в решетке алмаза — 4.

Так как в решетке NaCl расстояние между ионами равно 0,2815 нм, то вдоль 1 см вещества (ребра куба) уложилось бы 35,5 млн. $(3{,}55 \cdot 10^7)$ атомов. Следовательно, в 1 $см^3$ монокристалла поваренной соли около $4{,}45 \cdot 10^{22}$, т. е. $(3{,}55 \cdot 10^7)^3$ атомов.

Трудно представить себе такое колоссальное количество. Поясним его таким примером. Если бы в сосуд было помещено $4{,}5 \cdot 10^{22}$ атомов (скажем, гелия) и ежесекундно из этого сосуда вылетал бы миллион атомов, то за год количество атомов уменьшилось бы в сосуде на $3{,}2 \cdot 10^{13}$. А за миллион лет оно уменьшилось бы всего на $3{,}2 \cdot 10^{19}$ атомов, т. е. менее чем на одну тысячную первоначального количества $(4{,}5 \cdot 10^{22})$. Напомним, что в одном моле любого простого вещества число атомов еще больше (число Авогадро $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$).

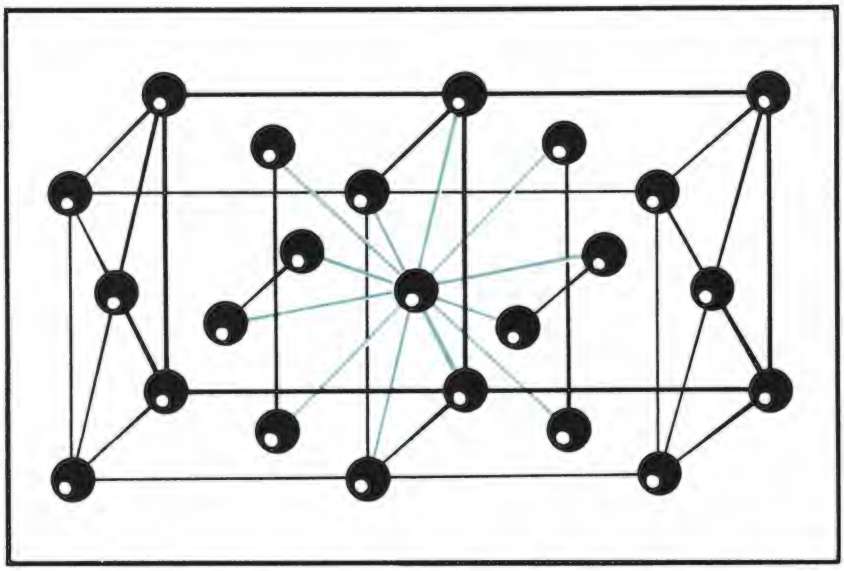


Рис. 7. В кристалле меди у каждого атома двенадцать соседей.

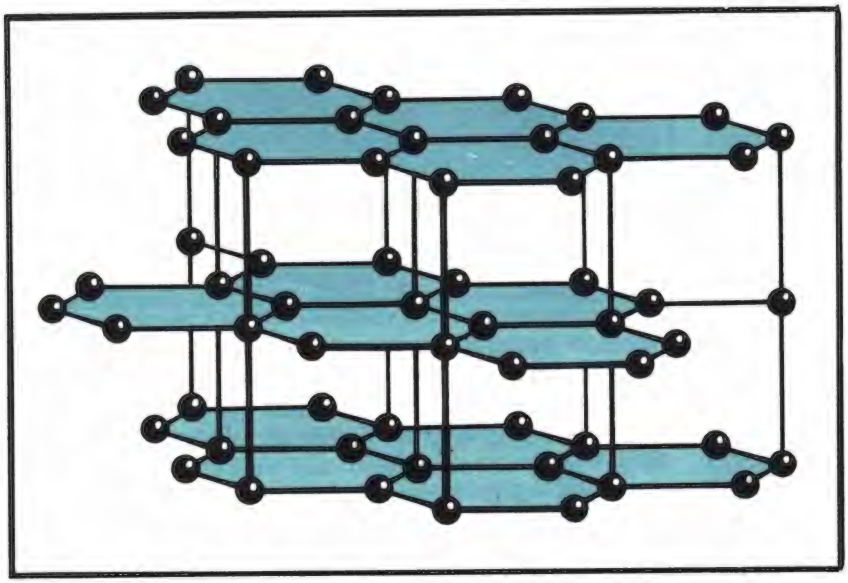


Рис. 8. Кристаллическая структура графита.

Структура кристалла и анизотропия. Даже в кубической структуре типа NaCl, в которой расстояния между атомами одинаковы по трем направлениям, в других направлениях (кроме этих трех) свойства кристалла, например механические, сильно отличаются. Происходит это не только потому, что в других направлениях межатомные расстояния другие, но и вследствие иного распределения сил связи между атомами. Возьмем, например, направление объемной диагонали. Перпендикулярно ей чередуются плоскости, образующие грани октаэдра (рис. 6). Каждая из этих плоскостей состоит только из одного типа ионов (или Na^+, или Cl^-). Силы притяжения, возникающие между такими плоскостями, в 5,8 раза больше, чем между плоскостями, параллельными граням куба, в каждой из которых лежат и те и другие ионы: и Na^+ и Cl^-. Вот почему кристалл NaCl гораздо легче расколоть по плоскостям куба, чем по плоскостям октаэдра. Поэтому же и кристаллизуется поваренная соль, образуя кубы. Непонятная на первый взгляд «прихоть» природы оказывается вполне объяснимой.

У алмаза тоже кубическая решетка. Но атомы углерода предпочитают образовывать октаэдрические кристаллы. Каждый атом в алмазе окружен четырьмя соседями в вершинах тетраэдра, четырехгранника (рис. 9). Расстояние между ними одинаково, строго равно 0,154 нм. Такие короткие связи очень прочны, недаром алмаз — самое твердое природное вещество на Земле. Все четыре связи одинаковы, но, если из алмаза вырезать симметричный куб, количество связей, проходящих через единицу поверхности на грани такого куба, значительно больше, чем на грани октаэдра. Поэтому-то алмаз гораздо легче раскалывается (и кристаллизуется) по граням октаэдра, а не по граням куба.

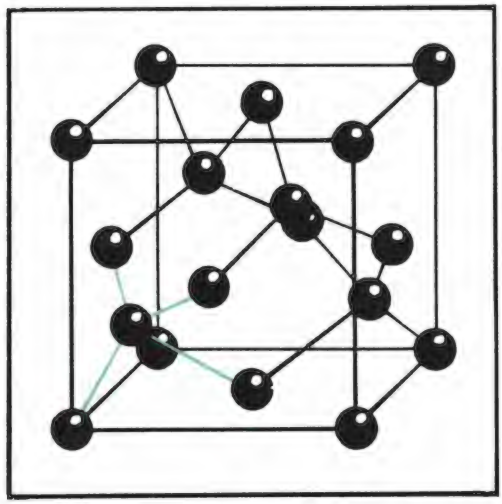


Рис. 9. Структура алмаза.

В некубических кристаллах закон анизотропии проявляется еще более разительно. На рисунке 8 показана кристаллическая гексагональная решетка графита. Графит, как и алмаз, состоит из атомов углерода. Но атомы образуют в элементарной ячейке не тетраэдры, а шестиугольные кольца. В пределах слоя этих колец расстояние между атомами одинаково и равно всего 0,145 нм. Эти связи очень прочны, прочнее, чем у алмаза. У каждого атома в слое три связи. Четвертая же связь, перпендикулярная слою, очень длинна — 0,335 нм — и поэтому слаба. Она легко рвется. Графит хорошо расщепляется вдоль слоев решетки и очень мягок. В направлениях, параллельных и перпендикулярных слоям, в графите резко отличаются не только твердость, но и теплопроводность, электропроводность и многие другие свойства.

Реальные кристаллы. В идеальном кристалле, каким мы только что его описали, дальний порядок охватывает миллионы миллионов атомов. В тех же кристаллах, которые существуют в природе, т. е. в реальных кристаллах, этот порядок чаще всего нарушен (рис. 10).

В простом веществе, допустим в меди, атомы могли бы занять все узлы решетки только при абсолютном нуле, т. е. при 0 К. При более высокой температуре атомы переползают из глубины кристалла на его поверхность, оставляя внутри незанятые узлы, «вакансии». Такое строение называется *структурой Шоттки.*

При еще более высокой температуре атомы просто смещаются с узлов в междуузлия — образуется *структура Френкеля.*

Атомы примесей могут проникнуть в кристалл и занять места в свободных узлах. Такое построение называется *структурой замещения.*

Могут они поместиться и в междуузлиях, тогда возникает *структура внедрения.*

В химических соединениях или сплавах, например АБ, их компоненты могут образовывать между собой *структуры взаимозамещения.* При повышении температуры все больше атомов одного компонента проникает в позиции второго компонента и, наоборот, атомы второго компонента — в позиции первого. Беспорядок в кристаллах усиливается.

В химии полупроводников чрезвычайно важны структуры *вычитания*, когда в соединении АБ один вид атомов (обозначенный синим) частично отсутствует. Такие структуры содержат меньшее число атомов А или Б. На рисунке 10, *з* этот дефект показан пунктиром.

Все эти нарушения правильной структуры кристаллов в отдельных узлах или междуузлиях называются *точечными дефектами.* Они очень влияют на механические, электрические и другие свойства кристаллов. Кроме точечных дефектов в твердых телах и стеклах возникают и протяженные дефекты (трещины, сдвиги), которые также отражаются на многих свойствах вещества, например на прочности.

Механическая прочность тела. Железная проволока сечением 1 мм^2 разрывается силой 981 Н; ее сопротивление разрыву $981 \cdot 10^6$ Н/м^2. У стеклянной нити того же сечения сопротивление разрыву в 10 раз меньше (в среднем). Можно ли считать, что это подлинная прочность стекла? Советские ученые доказали, что если вместо одной толстой стеклянной нити площадью сечения 1 мм^2 взять стеклянное волокно из 1000 нитей (площадь сечения каждой 0,001 мм^2), то прочность такой составной нити возрастет примерно в 10 раз, т. е. сравняется с прочностью железной проволоки.

Причина такого загадочного явления оказалась прежде всего в... трещинах. Если одна-единственная крохотная трещина возникает в волокне площадью сечения 1 мм^2, то под действием нагрузки эта трещина начинает быстро удлиняться, пока волокно не лопнет. Если та же трещина возникает в одном из 1000 тончайших волоконец нити, то это волокно также разорвется, но другие 999 волокон останутся неповрежденными, и стеклянная нить выдержит нагрузку.

Это замечательное явление уже используется в технике.

Стеклянное волокно, склеенное пластмассой,— стеклопластик — прочный материал. Из него можно делать детали машин, корпуса катеров и лодок не менее прочные, чем из стали, но гораздо более легкие. Многим любителям рыбной ловли известны великолепные удилища, а спортсменам — лыжные палки из стеклопластика. Они легки и очень прочны.

Такие свойства реальных кристаллов и стекол открывают перед техникой новые возможности. Если нужно резко *повысить* прочность твердого тела, не

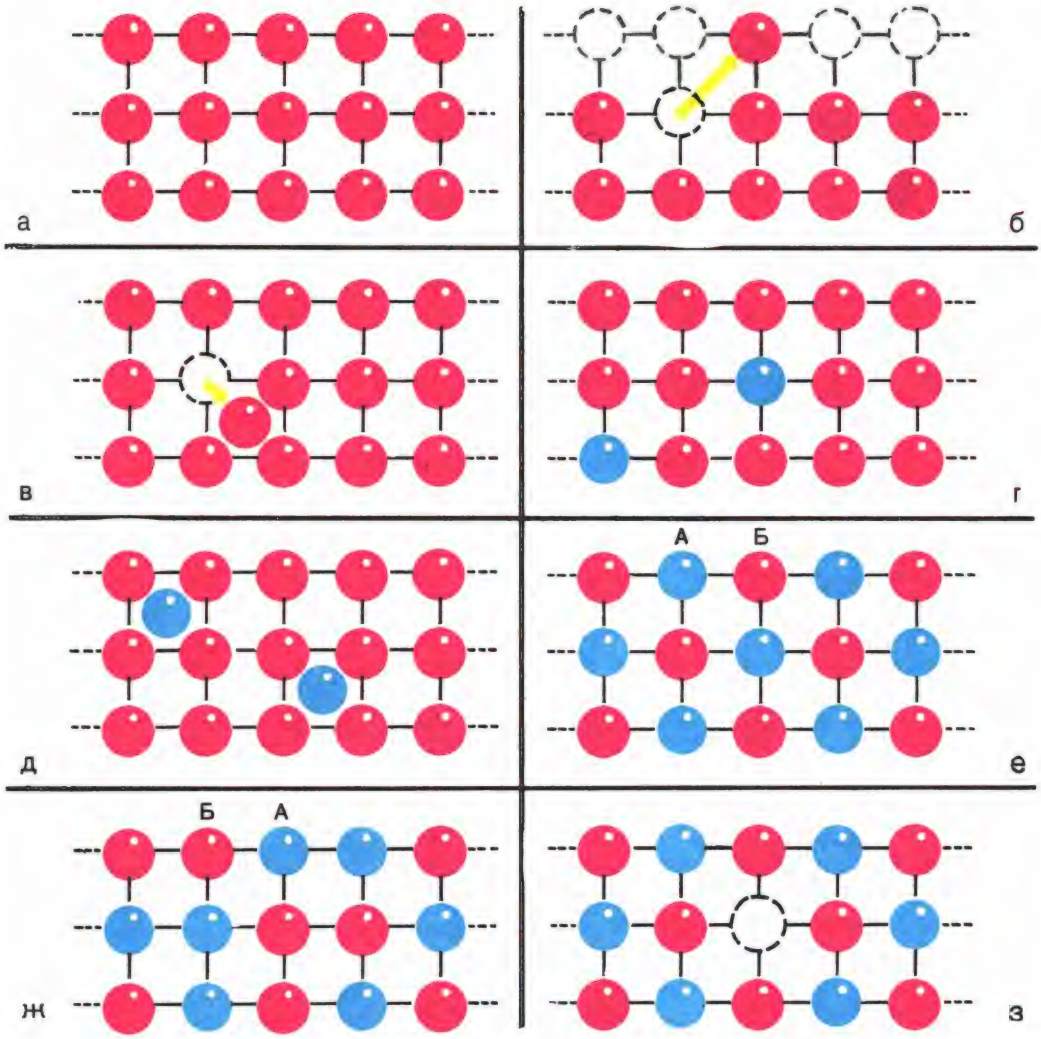


Рис. 10. Структуры реальных кристаллов: *а* — идеальный кристалл; *б* — структура Шоттки, атомы переползают из глубин кристалла на поверхность, оставляя внутри незанятые узлы; *в* — структура Френкеля, атомы смещаются из узлов в междуузлия; *г* — структура замещения, атомы примеси проникают в кристалл и размещаются в узлах; *д* — структура внедрения примеси в междуузлия; *е* — сплав АБ с бездефектной структурой; *ж* — сложная структура взаимозамещения А на Б и Б на А; *з* — структура вычитания, некоторые узлы остаются вакантными.

всегда обязательно создавать новое вещество. Устранив дефекты, можно во много раз повысить прочность уже известного вещества.

Чтобы *понизить* прочность твердого тела и тем самым облегчить его помол (дробление), можно ввести в него так называемые поверхностноактивные вещества, которые проникают по трещинам в глубь кристалла и значительно облегчают его раскалывание (см. ст. «Замечательные явления на границах между телами»).

Электронная структура твердых тел

Металлы, диэлектрики, полупроводники. Много веков известны человечеству металлы. Из них изготовлялись машины, оружие, утварь. В прошлом веке открыли возможность передавать на многие тысячи километров электрическую энергию. *Металлы*, например серебро, медь и алюминий, оказались превосходными проводниками электричества. Электрические провода изготовляются сейчас из меди и алюминия, а для очень точных приборов и из серебра.

Для электропередач кроме проводов потребовались и изоляторы, например слюда, фарфор. Такие материалы называют *диэлектриками*. Они практически не проводят ток и препятствуют его потерям в электрической сети. Есть много веществ, промежуточных по электропроводности между металлами и диэлектриками. Они и проводники плохие, и изоляторы негодные. Их назвали *полупроводниками*. До второй четверти нашего века они не вызывали особого интереса. А сейчас нет школьника, который не слыхал бы о фантастических свойствах полупроводников (см. ст. «Полупроводники»). Попытаемся приоткрыть завесу важных научных «тайн», показать

увлекательнейшие пути развития современной техники. От читателя требуется лишь внимание.

Строение изолированного атома. Различия между металлами, полупроводниками и диэлектриками вызваны тонкими деталями в строении электронных оболочек атомов и особенностями энергетических уровней в твердых телах. *Изолированный (одиночный) атом* любого элемента состоит из положительно заряженного ядра и окружающих ядро электронов. Число электронов в атоме равно порядковому номеру элемента в периодической системе. Электроны расположены в концентрических оболочках с порядковыми номерами (главными квантовыми числами) $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ и т. д. Начало периода в периодической системе связано с началом заполнения наружными валентными электронами новой оболочки. Каждая оболочка означает разрешенный энергетический уровень, т. е. определенную величину энергии электрона. Между оболочками лежит запрещенная энергетическая область, в которой электрон находиться не может; пребывая на оболочке, электрон, а значит и атом, сохраняет неизменную энергию (рис. 1).

Свет, как известно, может рассматриваться и как явление *волновое*, и как *корпускулярное*, т. е. как поток квантов (см. ст. «Свет»). Взаимодействие света с электронными оболочками атома легко понять, исходя из квантовой теории света Планка — Эйнштейна и квантовой теории строения атома Бора — Эйнштейна.

Энергия светового кванта определяется простой формулой $E_{св} = h\nu$, где h — постоянная величина (постоянная Планка), а ν — частота. Взаимодействие света с атомом может привести к возбуждению атома — перескоку электрона на ближайшую наружную энергетическую оболочку, но при условии, что величина кванта света $E = h\nu$ равна ширине запрещенной области, т. е. энергетическому зазору между оболочками ΔE:

$$h\nu = E_{св} = \Delta E = E_2 - E_1.$$

В этом случае атом поглощает световую энергию (см. ст. «Волны и кванты»).

Атом в возбужденном состоянии (уровень E_2) может излучать кванты света $\Delta E = E_2 - E_1$ в точности той же величины (а значит, свет той же длины волны) с обратным переходом электрона на внутренний, более низкий энергетический уровень E_1. Механизм электронных перескоков в атомах любых элементов один и тот же: переход с уровня более близкого к ядру на более дальний требует затраты строго определенного количества энергии — кванта электромагнитного излучения; при обратном переходе выделяется такой же квант. Каждая электронная оболочка имеет энергетические подуровни, или подоболочки. Оболочка с главным квантовым числом $n = 1$ имеет один подуровень, обозначаемый s. Если $n = 2$, то подуровней четыре: один s и три p (s^1p^3). Если $n = 3$, то подуровней девять: один s, три p и пять d. Согласно принципу Паули, на каждом подуровне может находиться не более двух (антисимметричных) электронов. Рассмотрим следствия применительно к атому кремния. Электронная оболочка кремния ($n = 3$) имеет четыре квантовых состояния (s^1p^3, ибо энергия возбуждения в d-состоянии слишком велика) и, согласно принципу Паули, может вместить 8 электронов при условии антисимметричного расположения спинов двух электронов в каждом состоянии. Третьему электрону появление в занятом квантовом состоянии этим принципом запрещено. У атома кремния четыре валентных электрона (их распределение в основном состоянии см. на рис. 2, *а*). В первом возбужденном состоянии s- и p-состояния изолированного атома заняты лишь одиночными электронами (рис. 2, *б*).

Энергетические зоны в твердом теле. В результате образования твердого тела происходит сближение колоссального числа атомов, около 10^{22}—10^{23} на 1 см^3 вещества. При этом существенно изменяется его квантовая структура. В этих условиях энергетические уровни изолированных атомов влияют друг на друга. Они чуть-чуть смещаются, и в твердом теле из каждого уровня возникает энергетическая полоса, зона уровней. Наружная зона валентных электронов атома называется *валентной зоной*.

Лежащий снаружи ее незаполненный энергетический квантовый уровень атома превращается в твердом теле в *зону проводимости*. От характера взаимного расположения валентной зоны и зоны проводимости существенно зависят свойства твердого тела. При этом возможны несколько случаев.

1. *Зона проводимости и валентная зона перекрываются* (рис. 3, *а*). В этом случае электрон из валентной зоны без затраты энергии может попасть в зону проводимости. Образуется проводник. В электрическом поле такие электроны легко перемещаются, ибо зона проводимости незаполнена, есть свободные квантовые состояния.

2. *Валентная зона заполнена частично.* В этом случае в ней есть свободные энергетические уровни и электроны в ней могут легко перемещаться.

3. *Зона проводимости и валентная зона не перекрываются*, т. е. между ними остается энергетический зазор. Возникает в зависимости от ширины этого зазора полупроводник или диэлектрик (рис. 3, *б*). Для попадания электрона из валентной зоны в зону

Рис. 1. Электронные оболочки изолированного атома — разрешенные энергетические уровни. Модель Бора — Эйнштейна.

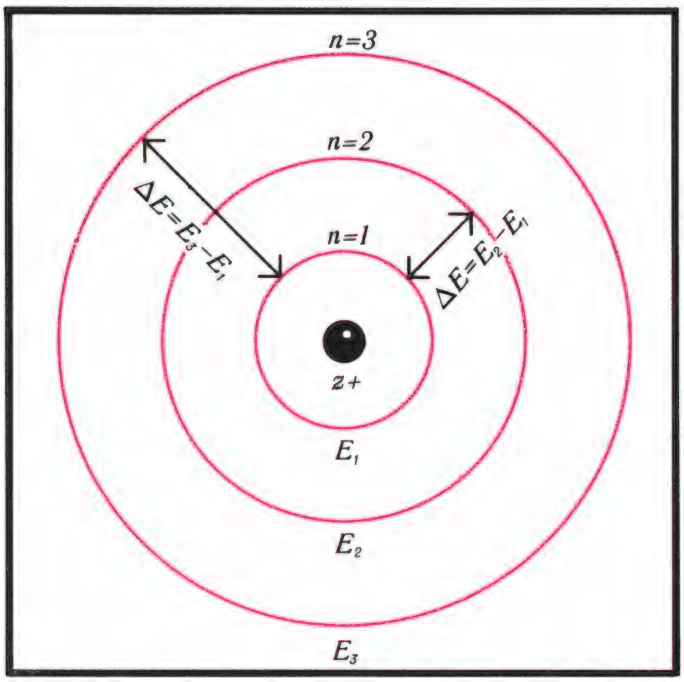


Рис. 3. Зонная модель образования: *а* — металла; *б* — полупроводника (диэлектрика) при сближении изолированных атомов.

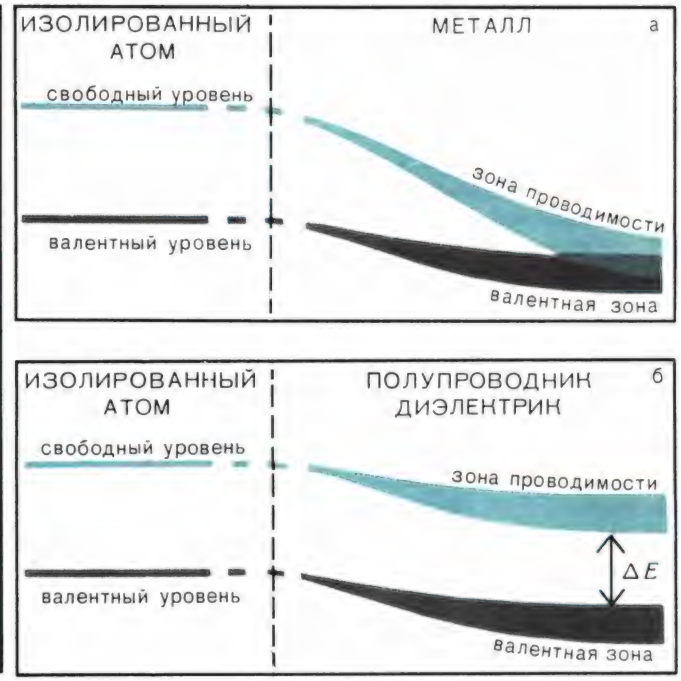
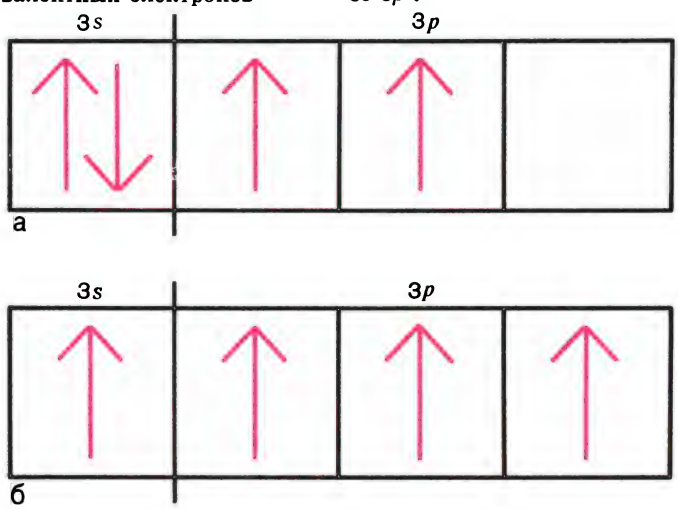


Рис. 2. Внешняя (валентная) электронная оболочка атома кремния: *а* — распределение четырех валентных электронов атома кремния в основном состоянии по четырем квантовым состояниям $3s^2 3p^2$; *б* — то же в первом возбужденном состоянии $3s^1 3p^3$.



проводимости он должен получить квант энергии ΔE, равный энергетическому зазору между зонами, именуемому запрещенной зоной. ΔE определяется в электрон-вольтах (эВ).

Первый и второй случаи характерны для металлов. Благодаря возможности свободного перемещения электронов металлы являются хорошими проводниками. Так как нас интересуют полупроводники, вернемся к кристаллу кремния. Его поведение в электрическом поле зависит еще и от заполнения квантовых состояний кремния валентными электронами.

Кремний образует структуру алмаза. Каждый атом окружен четырьмя соседями и, значит, образовал четыре связи. Каждая связь осуществляется двумя электронами: одним — от атома кремния, другим — от соседа (рис. 4, *а*). К четырем собственным валентным электронам кремния добавляются четыре электрона (по одному от четырех соседей). Теперь в валентной зоне кремния заняты все четыре квантовых состояния, двумя электронами каждое (рис. 4, *б*). В электрическом поле при температуре абсолютного нуля кремний проводить не может, ибо для этого электрон валентной зоны должен передвигаться по квантовым состояниям последней. Однако каждая квартира уже занята двумя жильцами, а появление в ней третьего запрещается принципом Паули. В зону проводимости электрон также заброшен быть не может — энергия теплового движения при комнатной температуре ничтожно мала: $\frac{3}{2} kT \approx 0{,}04$ эВ, и за ее счет он не может преодолеть запрещенную зону $\Delta E = 1{,}12$ эВ. С повышением температуры, однако, все усиливается возможность заброса ничтожного количества электронов валентной

зоны в зону проводимости за счет тепловой энергии кристалла или за счет кванта света. Эти электроны могут легко проводить ток, направляясь к катоду, причем электропроводность равна $\sigma = e^- n \mu_-$, где n — число электронов, μ_- — их подвижность и e^- — заряд электрона. После отрыва электрона от связи в последней остается один электрон, т. е. в квантовом состоянии валентной зоны возникает незанятое место.

Теперь принцип Паули не запрещает перескока на это место электрона валентной зоны, направляющегося к аноду (положительному электроду). Этот электрон оставит после себя незанятое место, которое смещается (в результате серии скачков электронов) в обратном направлении, к катоду (отрицательному электроду). Иначе говоря, оно ведет себя как положительная дырка. Тогда суммарное уравнение $\sigma = e^- n \mu_- + e^+ p \mu_+$. В *чистом* полупроводнике концентрация электронов n равна концентрации дырок p. (С перескоком электронов чистейшего полупроводника в зону проводимости в валентной зоне остается ровно столько же положительных дырок.) Чем больше ширина запрещенной зоны полупроводника, тем меньше электронов может при данной температуре перескочить из валентной зоны в зону проводимости. У кремния $\Delta E = 1{,}12$ эВ, у германия — 0,72 эВ. Поэтому у германия электропроводность при равных условиях больше, чем у кремния. Когда температура полупроводника повышается, из валентной зоны все больше и больше электронов переходит в зону проводимости. Например, в 1 см^3 чистейшего германия $4 \cdot 10^{22}$ атомов; при комнатной температуре из валентной зоны переходит в зону проводимости только 10^{13} электронов, т. е. один электрон на $4 \cdot 10^9$ атомов. При температуре 300° С такой переход совершают уже 10^{17} атомов, т. е. в 1000 раз больше. Электропроводность германия очень быстро растет при повышении температуры.

Аналогично ведет себя полупроводник, когда на него падает свет, если энергия светового кванта достаточна для перескока электрона через запрещенную зону. Полупроводниками считаются вещества, у которых ширина запрещенной зоны ΔE меньше 3,0 эВ. Для диэлектриков она выше 3,0 эВ. Отсюда следуют важные выводы. Видимая область спектра простирается от 0,4 до 0,8 мкм; ниже 0,4 мкм — ультрафиолетовая область, выше 0,8 мкм — инфракрасная. Длина волны кванта света, необходимого для преодоления запрещенной зоны ΔE, связана с величиной ΔE простой формулой:

$$\lambda_{\text{мкм}} = \frac{1{,}24}{\Delta E_{\text{эВ}}},$$

полученной из формулы $\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. Значит, полупроводники с ΔE ниже 1,5 эВ чувствительны к инфракрасным лучам, а при ΔE больше 1,5 эВ и до 3,0 эВ — к видимым. Эти простые соотношения позволят выбирать полупроводник для использования в том или ином приборе в зависимости от намеченных условий работы. Например, если на полупроводник сульфид кадмия ($\Delta E = 2{,}4$ эВ) падает красный свет ($\lambda \geqslant 0{,}7$ мкм), то сульфид кадмия не может отреагировать на такой луч, квант которого гораздо меньше ($E = 1{,}24 : 0{,}7 = 1{,}8$ эВ) ширины запрещенной зоны. Зато синий свет ($\lambda = 0{,}45$ мкм; $E = 2{,}8$ эВ) обеспечит активную работу прибора.

Чистые вещества и примеси. Если полупроводник не чистый и в нем есть какая-то незначительная примесь, которую даже невозможно определить обычным химическим анализом, физики говорят, что в нем следы примеси. Свойства полупроводника со следами примеси уже иные, чем чистого. Возьмем, например, полупроводник германий Ge со следами мышьяка As. У атома мышьяка пять внешних электронов (это элемент 5-й группы периодической системы); а у атома Ge четыре внешних электрона. Лишний электрон в валентной зоне не нужен, так как все места в атомных связях заняты. В таком полупроводнике за счет этих электронов возникает около зоны проводимости *донорный*, т. е. отдающий электроны, примесный уровень. Энергетический разрыв ΔE_d между зоной проводимости и примесной зоной очень мал, электрону примесного уровня очень легко перескочить в зону проводимости (рис. 5). При комнатной температуре каждый атом As отдает в зону проводимости один электрон. Допустим, что в этом полупроводнике один атом As приходится на 10^8 атомов Ge. Следовательно, в 1 см^3 на $4 \cdot 10^{22}$ атомов Ge — $4 \cdot 10^{14}$ атомов As. Уже при комнатной температуре в зоне проводимости окажется $4 \cdot 10^{14}$ электронов, т. е. в 40 раз больше, чем в беспримесном полупроводнике. Полупроводник с донорным примесным уровнем называется *электронным* и обозначается буквой n, например: n — Ge. В таком полупроводнике электропроводность создается электронами, перешедшими в зону проводимости с донорного уровня. Валентная же зона остается заполненной, дырок в ней почти нет, поэтому дырочная проводимость отсутствует.

Следы примеси галлия придают германию уже совсем другие свойства. В валентной оболочке галлия всего три электрона. Следовательно, в каждой связи не хватает одного электрона в результате замены атома Ge на атом Ga. В валентной зоне такого полупроводника образуются положительные дырки, а в за-

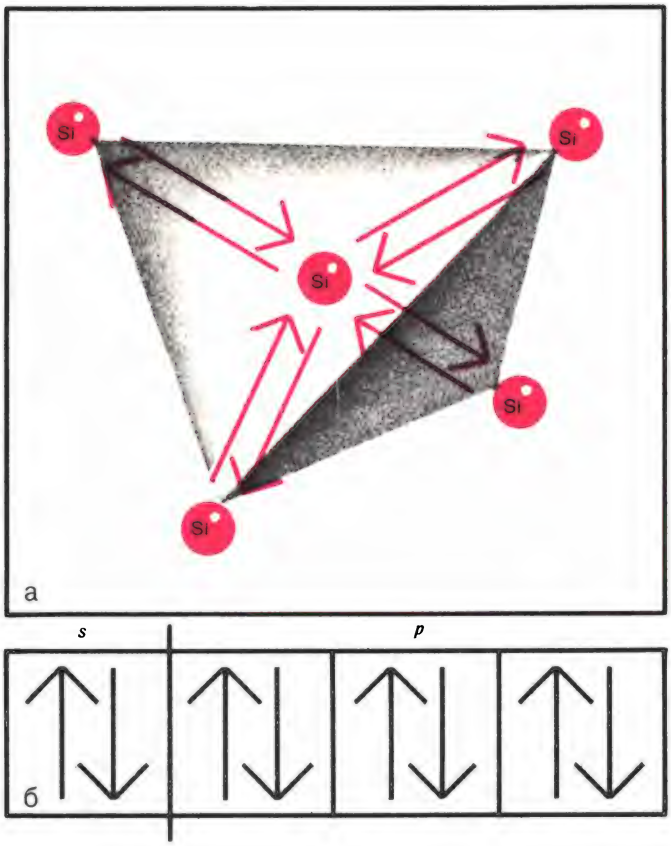
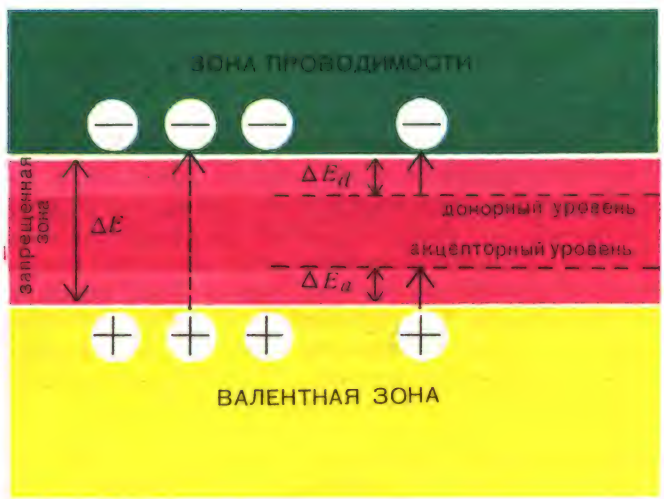


Рис. 4. Четыре связи атома кремния в кристалле (*а*); заполнение восемью электронами четырех квантовых состояний кремния в кристалле (*б*).

Рис. 5. Положение донорных и акцепторных уровней в примесном полупроводнике.



прещенной зоне появляется *акцепторный*, т. е. принимающий электроны, уровень. Перескок электрона из валентной зоны на акцепторный уровень также требует ничтожной затраты энергии. Он происходит уже при комнатной температуре. Такой примесный полупроводник называется *дырочным* и обозначается буквой p, например: p — Ge. Примесь одного атома галлия на 10^8 атомов германия вызывает высокую дырочную проводимость. Дырки образуются за счет ухода части электронов из валентной зоны на акцепторный уровень примеси, зона же проводимости остается почти пустой, и электронная проводимость почти отсутствует.

Дефекты в структуре полупроводника и его свойства. Свойства твердых тел определяются их химическим составом и строением элементарных ячеек. Но за последние десятилетия выяснилось, что закон постоянства состава (где бы и как бы соединение ни получалось, его состав и свойства всегда одни и те же) для твердых тел иногда неприменим. Например, в сульфиде свинца (PbS) на атом Pb не обязательно приходится один атом S, а формулу сульфида свинца правильнее было бы понимать как соотношение Pb и S между $Pb_{0,9995}S$ и $PbS_{0,9995}$. Если тело — полупроводник, как в данном случае, то даже ничтожные отклонения индексов Pb и S в сторону недостатка серы или свинца влекут за собой резкие изменения электропроводности и других физических свойств (иногда в миллионы раз). Меняется и знак проводимости. Недостаток серы ведет к образованию электронного, а недостаток свинца — дырочного сульфида свинца. Мы столкнулись здесь с неожиданным и важным явлением: в основном составе полупроводника не только присутствующие, но и отсутствующие атомы влияют на его полупроводниковые свойства так же сильно, как и ничтожные следы примеси. В полупроводниках ничтожные концентрации точечных дефектов, вызванные структурой вычитания, т. е. нехваткой части атомов, влекут за собой интересные возможности. Например, сульфид кадмия CdS, теряя следы серы

$$Cd^{p+}S^{p-} = Cd^{p+}S^{p-}_{1-y}[\ ]^{p-}_{y} + \frac{y}{2}\cdot S_2^{\uparrow},$$

увеличивает электропроводность на 10 порядков, т. е. в 10 млрд. раз (где y равно, например, 0,005, а $[\ ]^{p-}_{y}$ обозначает вакансию, связанную с зарядом).

Причина ясна из самого уравнения: заряд, связанный с вакансией, равносилен донорному уровню и легко перебрасывается в зону проводимости, обусловливая огромный рост проводимости, как и в случае примеси.

В полупроводниках ничтожные концентрации точечных дефектов, вызванные нехваткой части атомов одной из подрешеток, влекут за собой настолько значительные изменения свойств, что эта область полупроводниковой электроники создала целое новое направление науки и технологии производства приборов.

Полупроводники

Нужды электротехники XIX в. в обеспечении передачи энергии на расстояние потребовали изучения электрической проводимости веществ. Вскоре четко определились два практически важных класса: проводники — металлы, например медь, и изоляторы, диэлектрики — некоторые неметаллы, например фарфор. Ток передается по проводам, которые подвешены во избежание утечки на изоляторах.

Вещества, которые оказались плохими проводниками, но и плохими изоляторами, были названы полупроводниками. Могут ли они представлять ценность для практики, было неясно. И только в 30—40-х годах XX в. наука о полупроводниках и производство полупроводниковых приборов совершили головокружительный скачок.

Развитие квантовой механики и создание электронной теории твердых тел позволили понять различия между металлами, полупроводниками и диэлектриками, объяснить и предсказать особенности поведения полупроводников, найти им важнейшее практическое применение.

Из электронной теории (см. ст. «Электронная структура твердых тел») известно, что в полупроводнике существуют валентная зона и зона проводимости, разделенные запрещенной зоной. Не нужно только представлять себе, что валентная зона и зона проводимости — это две различные зоны в пространстве, что валентная зона расположена где-то в одном месте, а зона проводимости — в другом. И валентная зона и зона проводимости — это зоны энергетические, а не пространственные, каждая из них существует во всем объеме полупроводникового кристалла. Для перехода из валентной зоны в зону проводимости электрону не нужно совершать каких-то путешествий — ему достаточно лишь увеличить свою энергию, например поглотив квант света — *фотон*.

При нагревании полупроводника в нем все большее и большее количество электронов переходит в зону проводимости и участвует в образовании электрического тока.

Значит, полупроводник при нагревании не уменьшает, как металл, а, наоборот, увеличивает свою электропроводность (рис. 1). В этом заключается важный физический признак любого полупроводникового материала.

Свойства полупроводников сильно зависят от их состава. Стоит ввести в чистый полупроводник совсем небольшое количество другого химического элемента, как появляется либо избыток электронов — благодаря донорному уровню примеси, либо избыток дырок — благодаря акцепторному уровню примеси.

Рис. 1.

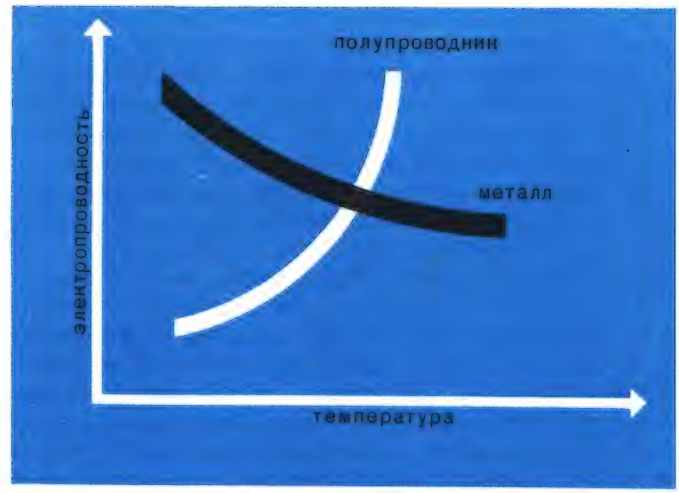
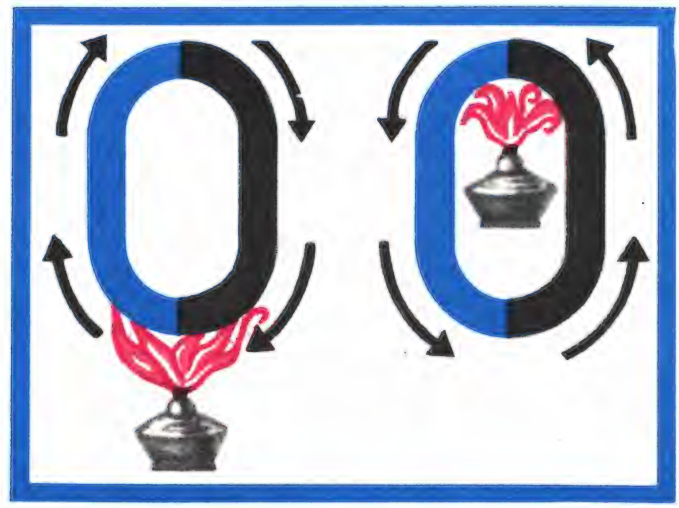


Рис. 2. Термистор действует так же, как и обычная термопара, т. е. спай двух полосок из различных металлов. При нагреве стыка полосок возникает ток. Его направление зависит от того, какой из стыков нагревается.



Термисторы

Самая простая особенность полупроводника — ярко выраженная зависимость его электропроводности от температуры. Мы знаем, что чем сильнее нагрет полупроводниковый материал, тем лучше он проводит

ток. Приборы, использующие этот эффект, называют *термосопротивлениями* или *термисторами* (рис. 2).

Каких только термисторов сейчас не встретишь на наших заводах, в научно-исследовательских институтах, в больницах, в колхозах! Есть, например, многометровые штанги, которыми удобно проверять температуру где-нибудь в глубине наполненного зерном элеватора. Есть термисторы, похожие на кинжалы. Их втыкают в почву, чтобы узнать, насколько нагреты разные ее слои. Миниатюрными полупроводниками — электротермометрами агрономы измеряют, как нагревается поверхность листьев растений, а врачи — температуру разных участков кожи больного. Крошечные чувствительные элементы термисторов можно вводить прямо в кровеносный сосуд!

Инженеры ставят термисторы в машины, чтобы вовремя получить предупреждение о чрезмерном разогревании детали. Очень широко начинают применяться эти приборы в автоматике, всюду, где нужно поддерживать постоянную температуру или связанные с ней физические величины (например, влажность, скорость движения газа).

Чувствительность некоторых полупроводниковых термисторов настолько велика, что на их основе строят особые приемники лучистой энергии — *болометры*. За несколько километров они могут уловить тепловое излучение горящей папиросы и даже тепловые лучи, испускаемые человеческой кожей. От хорошего болометра не укроется ничего — темной ночью в заснеженной степи он отыщет замерзающего человека, в ненастном небе без радиолокатора найдет невидимый самолет.

Полупроводниковые «глаза»

Луч света, падающий на полупроводник, переводит часть электронов из валентной зоны в зону проводимости и, следовательно, увеличивает электропроводность полупроводника.

Давно уже перестали быть редкостью прочные и миниатюрные полупроводниковые «глаза» — *фотосопротивления*, или *фоторезисторы*. Они идут в технику на смену хрупким и дорогим стеклянным фотоэлементам и надежно работают в различных автоматических устройствах. Можно, например, заставить падать на фотосопротивление тень от деталей, проходящих по заводскому конвейеру, и таким образом подсчитать количество выпущенных деталей, оценить качество шлифовки, окраски изделия. Часто применяются фотосопротивления в устройствах техники безопасности. Стоит рабочему случайно попасть рукой в опасное место машины, как на фотосопротивление падает тень, и ток, текущий через него, прекращается, что служит командой для немедленной автоматической остановки машины.

Фотосопротивления, как и термисторы, могут обладать очень высокой чувствительностью. Прибавьте к этому надежность и прочность, и вы поймете, как ценны эти приборы для техники.

Нагреватели и светильники

Представьте себе электрокипятильник для воды в виде небольшой трубки, которая надевается прямо на водопроводный кран. Трубка сделана из стекла, на которое изнутри нанесена тонкая пленка полупроводника. Когда через пленку идет ток, полупроводник сильно разогревается, и струя воды в трубке закипает. Вы открываете кран, и спустя секунду из трубки льется кипяток!

Некоторые полупроводники испускают при электрическом воздействии яркое свечение. Явление объясняется просто: электрическое поле воссоединяет электроны с дырками. Электроны как бы «проваливаются» в дырки. Такое объединение электрона с дыркой физики называют *рекомбинацией*. При этом освобождается энергия, которая и выделяется в виде света. Ученые разрабатывают на этой основе экономичные, удобные светильники, плоские телевизионные экраны и многое другое.

Существуют полупроводниковые материалы, которые светятся от воздействия потока электронов, рентгеновских и ультрафиолетовых лучей. Эти вещества — отличные покрытия для экранов рентгеновских установок, телевизионных трубок, ламп дневного света. Люминофоры — светящиеся материалы, которые в наши дни все шире входят в технику, в быт, даже в искусство,— это не что иное, как полупроводники.

Из полупроводников теперь делают счетчики радиоактивных частиц, всякого рода индикаторы и указатели, которые светят непрерывно десятки лет, питаясь энергией радиоактивного распада какого-либо вещества. Известны, наконец, полупроводники, которые способны как бы заряжаться светом, а потом отдавать его по электрической или световой «команде». Это свойство используется в полупроводниковых квантовых генераторах — *лазерах* (рис. 3).

Запирающий слой

До сих пор мы говорили о техническом применении полупроводников какого-либо одного вида — либо электронных, либо дырочных. Но есть устройства, в которых сочетаются оба вида полупроводников.

Представьте себе полупроводник, в котором как бы срослись два слоя с разными примесями — электронный (n) и дырочный (p), т. е. в нем имеется p — n-переход. Из электронного слоя в дырочный продвигаются благодаря диффузии электроны. Они оставляют пустые места в атомах — дырки. В дырочном же слое электроны — пришельцы из электронной области — «проваливаются» в дырки, количество которых поэтому уменьшается. Вблизи границы раздела получается с дырочной стороны избыток электронов, а с электронной — избыток дырок. В конце концов наступит равновесие, количество электронов-перебежчиков и дырок-перебежчиц уравняется. И тогда в дырочном слое у самой его границы возникнет ряд отрицательных зарядов, а в электронном — ряд положительных зарядов. Между двумя разноименными зарядами, как между обкладками заряженного конденсатора, появится электрическое поле. Оно будет направлено против новых «нарушителей границы». В электронном слое это поле станет задерживать электроны, стремящиеся перейти границу,— оттолкнет их обратно. А в дырочной области пограничное поле оттолкнет обратно новые дырки-перебежчицы. Движение зарядов через границу прекратится. На границе возникнет *запирающий слой,* преодолеть который носители тока не смогут без помощи внешнего электрического поля. Этот запирающий слой — основа многих ценнейших аппаратов и приборов.

Выпрямители. Кристаллы и лампы

Техника наших дней широко пользуется выпрямителями — устройствами, которые преобразуют переменный электрический ток в постоянный. Чаще всего это особые радиолампы — *кенотроны.* Их можно найти в любом сетевом радиоприемнике. Главными частями мощных выпрямителей для радиостанций, электроплавильных печей, электровозов были до недавних пор мотор-генераторы или приборы газового разряда — ртутные лампы. Такие устройства громоздки (для мощного мотор-генератора строят целое здание), неэкономичны, часто выходят из строя.

Теперь появились полупроводниковые выпрямители с запирающим слоем. Они прочны, надежны, миниатюрны и вместе с тем рекордно экономичны.

Пограничное электрическое поле в полупроводнике, состоящем из дырочной и электронной областей, существует независимо от того, подведены провода от электрической батареи к разным частям полупроводника или нет (рис. 4, *а*). Но внешнее поле сильно влияет на внутреннее поле запирающего слоя.

Если к электронной части полупроводника присоединить положительный полюс батареи, а к дырочной — отрицательный, то направление электрического поля батареи совпадет с направлением внутреннего поля в запирающем слое. Это расширит запирающий слой, и ток через прибор не пойдет (рис. 4, *б*).

А если поменять местами полюсы батареи, то поле батареи и поле запирающего слоя будут направлены в разные стороны. Сильное поле батареи переборет слабенькое поле запирающего слоя, «стража пограничников» — электронов и дырок — будет сметена, и через прибор потечет ток (рис. 4, *в*).

Теперь подведем к прибору переменное внешнее поле, т. е. такое поле, направление которого беспрестанно меняется. Запирающий слой станет то расширяться, то пропадать. При его расширении ток не будет идти через полупроводник, а в моменты исчезновения — пойдет. Значит, двухслойный полупроводник пропустит ток лишь в одну сторону и, следовательно, выпрямит переменный ток, превратит его в постоянный.

Купроксные (на закиси меди) и *селеновые* выпрямители давно применялись в технике. Сейчас внедряются мощные выпрямители из германия и кремния. Их, например, ставят на электровозы. В ближайшие годы во многих отраслях техники полупроводниковыми выпрямителями будут вытеснены дорогие и ненадежные кенотроны, ртутные колбы, мотор-генераторы. Кроме мощных выпрямителей созданы сравнительно маломощные полупроводниковые диоды, широко применяемые в радиотехнике для выпрямления и детектирования слабых сигналов.

Простейший полупроводниковый выпрямитель был широко распространен еще на заре радиовещания. Речь идет о *детекторе* — сердце детекторного радиоприемника. Кристаллик детектора преобразовывал быстропеременные электрические колебания, пойманные антенной, в пульсирующие постоянные токи, которые в наушниках рождали звук.

Конечно, в те времена детекторы работали не очень хорошо. Включая приемник, приходилось проволочкой нащупывать на кристалле место с хоро-

Рис. 3. Устройство полупроводникового лазерного излучателя. Полупроводниковый кристалл (*1*) с *p* — *n*-переходом (*2*) впаивается между двумя массивными металлическими дисками (*3*), изготавливаемыми из молибдена или меди и служащими для отвода тепла и одновременно для подведения к кристаллу электрического тока. Между дисками устанавливается изолирующая прокладка (*4*). Торцы кристалла тщательно отполированы. Лазерное излучение (*5*) наблюдается с торцов кристалла в плоскости *p* — *n*-перехода. Весь излучатель обычно помещается в криостат и охлаждается жидким азотом для более эффективной работы полупроводникового кристалла. Криостат имеет окошко для выхода лазерного излучения.

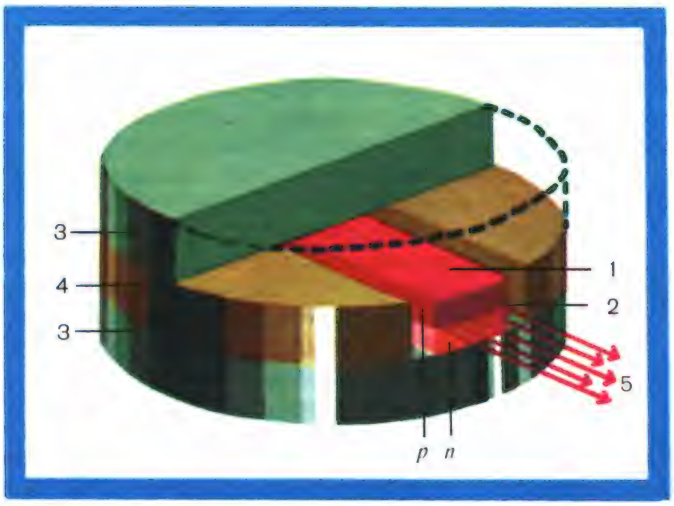
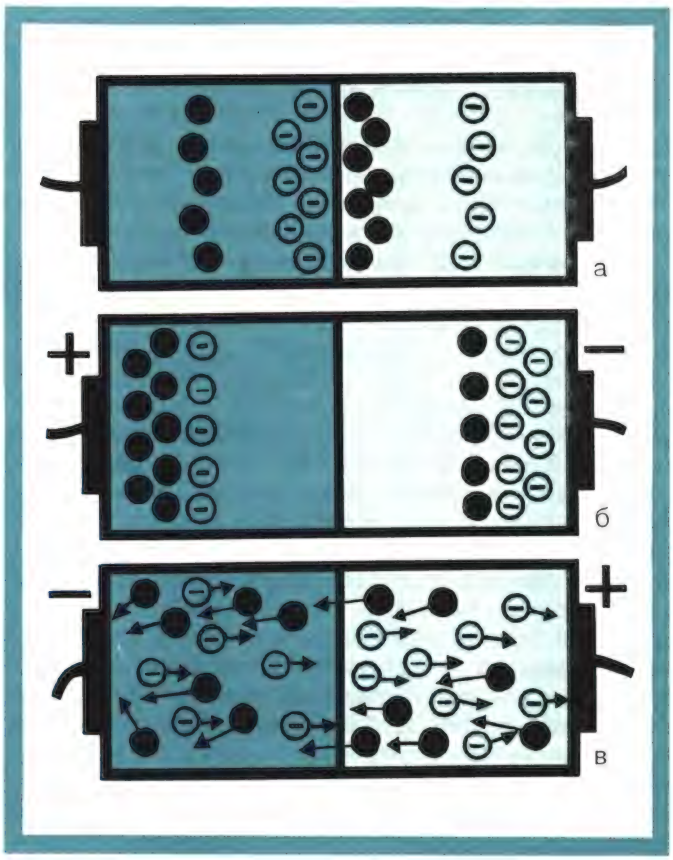


Рис. 4, *а*, *б*, *в*. На границе электронного и дырочного полупроводников возникает запирающий слой. Он пропускает электрический ток лишь в том направлении, при котором электроны и дырки движутся навстречу друг другу.



шим запирающим слоем — «чувствительную точку», которая то и дело сбивалась. Многие изобретатели старались улучшить детектор. Занимался этим в 20-е годы и сотрудник Нижегородской радиолаборатории О. В. Лосев. Сочетая в схеме два детектора, он научился слегка усиливать радиосигналы и возбуждать электрические колебания. Радиоприемники Лосева — кристадины — долгое время были популярны. Но потом, когда детекторы уступили место радиолампам, о кристадинах забыли.

Несколько десятилетий радиолампы безраздельно господствовали в радиотехнике. Осваивая и совершенствуя их, радиотехника добилась огромных успехов. С помощью радиоламп развились радиовещание, телевидение, радиолокация, автоматика, телемеханика. Появилась новая обширная область технической физики — *электроника*.

Но постепенно становилось ясно, что радиолампы далеко не безупречны. Хрупкие, недолговечные, неэкономичные, а главное, занимающие большой объем и сравнительно тяжелые, они все меньше удовлетворяли конструкторов. И тогда вспомнили о полупроводниковом детекторе. Возникла идея заменить стеклянный баллон радиолампы твердым полупроводниковым кристаллом.

Немало усилий потратила наука, чтобы «научить» детектор новым «профессиям». Надо было создать сочетание полупроводниковых кристаллов, способное не только выпрямлять токи, но и в широких пределах усиливать и возбуждать электрические колебания. В 1948 г. проблема была решена. Американские ученые Д. Бардин, У. Браттейн и У. Шокли создали первый полупроводниковый усилительный прибор — *транзистор*.

Транзистор

В кристаллическом усилителе слабым сигналом отпирается запирающий слой для большой силы тока. Представьте себе крошечный кусочек кристаллического полупроводника германия. У него электронная проводимость. На верхней грани кристалла специ-

Рис. 5. Транзисторы.

альной обработкой (введение примеси) создана область с дырочной проводимостью. Между дырочной и электронной областями образуется, как всегда, запирающий слой. Кристаллик снизу припаян к металлической пластинке — базе, а сверху к нему присоединены рядышком две проволочки — *эмиттер* и *коллектор*. Вот и весь прибор. Этот прибор называется *полупроводниковым триодом* или *транзистором* (рис. 5).

Когда нужно усилить очень слабый сигнал, его можно включить в прибор по-разному. Например, источник слабого сигнала подключается к эмиттеру и к базе в «пропускном» направлении запирающего слоя («плюс» — к дырочной области). А в цепи базы и коллектора включаются сопротивление и батарея в «запретном» направлении запирающего слоя (к дырочной области — «минус»).

Пока сигнала в цепи эмиттера нет, в цепи коллектора ток тоже не идет: его не пускает запирающий слой (рис. 6, *а*). Но вот сигнал подан. Через эмиттер в среднюю (дырочную) область кристалла входит импульс электрического поля (рис. 6, *б*). Он сметает запирающий слой, делая его электропроводным и для «запретного» направления. Между коллектором и базой возникает на мгновение как бы электропроводный мостик, и по нему пробегает усиленный импульс. Когда этот мгновенный импульс пройдет, у эмиттера и коллектора восстанавливаются запирающие слои. Так еле заметные сигналы, проходящие между базой и эмиттером, возбуждают в цепи коллектора и батареи мощный импульс тока. Происходит усиление сигналов.

Создано множество разновидностей транзисторов. Выпускаются кристаллические триоды для больших сил тока, полупроводниковые тетроды и пентоды (приборы с четырьмя и пятью контактами), усиливающие колебания высоких частот.

Разработаны полупроводниковые усилители, действующие на совершенно новых принципах. Физики предложили, например, погружать транзисторы в жидкий гелий. Там при сверхнизкой температуре приборы действуют с небывалой чувствительностью. Ведь при сверхнизкой температуре жидкого гелия едва заметно хаотическое тепловое движение атомов и электронов, а оно служит основным источником внутренних шумов электронной аппаратуры. Другой пример: созданы транзисторы, способные безотказно действовать при температуре в сотни градусов Цельсия.

Переворот в радиотехнике

Для миниатюрных радиоустройств на кристаллах изобретены и соответствующие им крохотные источники питания, например батарейки размером с трехкопеечную монету (рис. 7). Благодаря скромному «аппетиту» полупроводников такой батарейки им хватает на несколько месяцев.

Переворот в радиотехнике вызван также появлением миниатюрных радиодеталей: индукционных катушек, сопротивлений, ферритовых магнитных антенн размером с карандаш, крошечных, но достаточно емких конденсаторов. Развиваются техника и технология производства всевозможных радиоприборов. Вместо ювелирной ручной сборки на радиозаводах появились механизированные конвейеры и автоматика.

Благодаря применению полупроводниковых приборов стало возможно создание современных вычислительных машин.

Широко внедряется метод печатных схем: радиоаппаратура изготовляется своеобразным типограф-

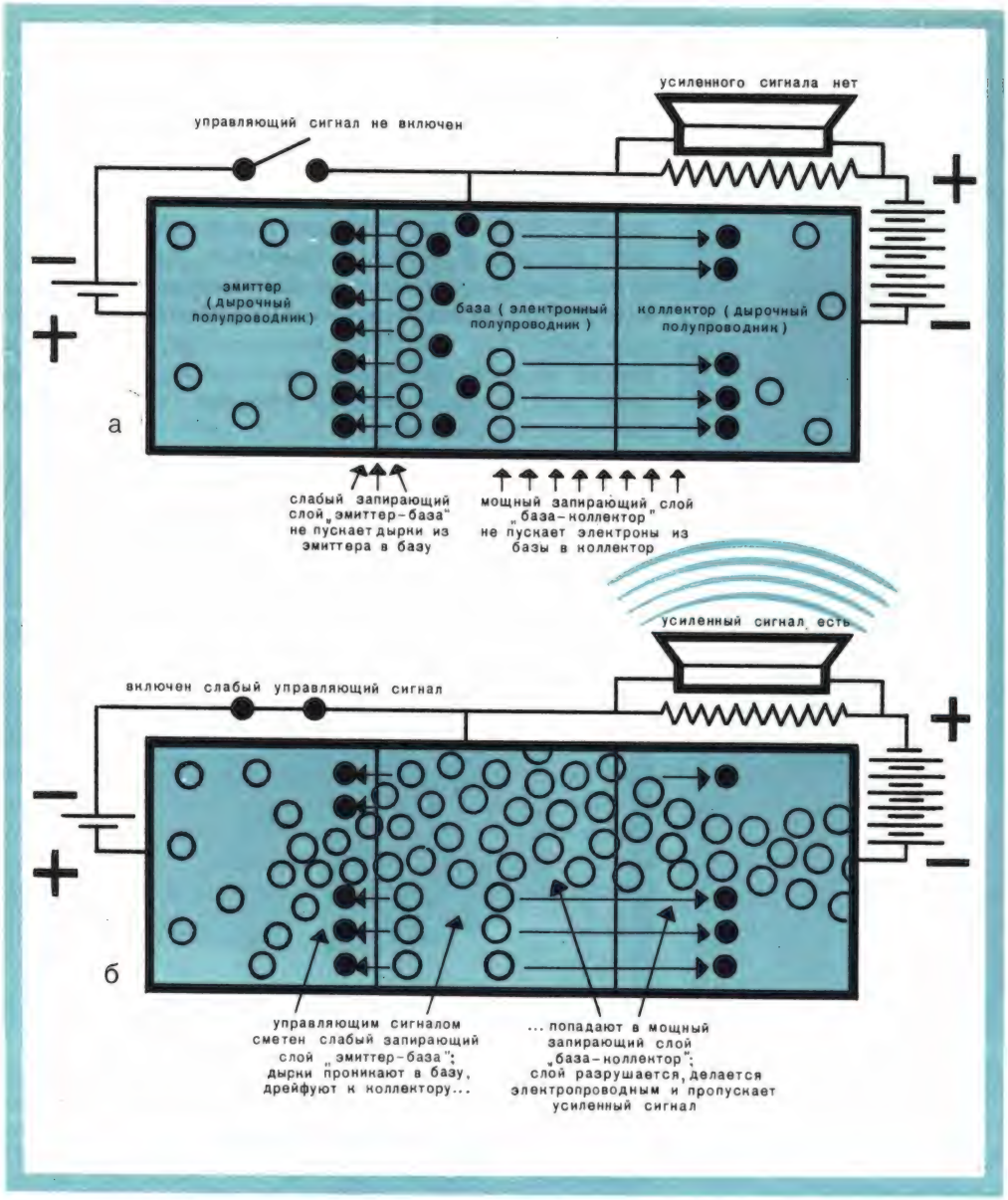


Рис. 6. Принцип действия транзистора: *а* — слабый импульс в цепи эмиттера «впрыскивает» дырки в запирающий слой; *б* — в этот момент между базой и коллектором возникает сильный импульс, который делает запирающий слой электропроводящим.

Рис. 7. Полупроводниковые радиоприборы.

ским способом, словно открытки или почтовые марки. Интересны так называемые микромодули. Это тонкие листки, на которых отпечатаны диоды, триоды, сопротивления и прочие элементы радиосхем. Складывая эти листки в стопки, получают бесчисленные варианты радиоприборов. Миниатюрность, экономичность и надежность сочетаются в них с быстротой и легкостью монтажа. Удается печатать сложнейшие радиосхемы на непрерывных лентах. Работая с ними, радиоконструктор становится похожим на портного-закройщика: из ленты вырезает ножницами необходимые куски и соединяет их в нужном порядке. Полупроводниковые «интегральные схемы» делают даже химическим путем — выращивают своеобразные сложные кристаллы, представляющие собой целые радиоэлектронные устройства.

Электростанция... на столе

В далеких деревнях и селах, в домах лесников и бакенщиков можно встретить своеобразную керосиновую лампу — «электростанцию»: она не только светит, но и вырабатывает электрическую энергию. Устройство ее довольно просто. Полупроводниковые брусочки смонтированы в виде трубки, которую надевают на укороченное ламповое стекло. Когда лампа зажжена, грани брусочков, обращенные внутрь трубки, разогреваются теплом горячих газов, поднимающихся от пламени. Противоположные грани

охлаждаются воздухом. В результате в полупроводниковой батарее рождается электрическая энергия.

Батарея построена из брусочков двух типов — электронных и дырочных. Все они соединены попарно. Каждая пара спаяна металлической пластинкой, образуя нечто вроде буквы П. Место спая нагревается, а противоположные грани брусочков охлаждаются. Нагрев рождает избыток носителей заряда, причем в разных полупроводниках разного знака. В электронном брусочке освобождаются электроны, а в дырочном — дырки. У нагретых граней возникает как бы «толчея» носителей тока, электроны и дырки перекочевывают к холодным граням — там «спокойнее». В результате у холодной грани дырочного брусочка накапливается положительный заряд, а отрицательный — у холодной грани электронного брусочка. Если холодные грани всех пар соединить проволокой, по ней потечет ток, возбужденный с помощью тепла.

Полупроводниковые термоэлектрогенераторы будут, конечно, широко применяться в технике. Ведь тепло в них превращается в электроэнергию непосредственно — совсем не так, как на современных тепловых электростанциях, где работают паровые котлы, турбины, электрогенераторы. В полупроводниковых термобатареях нет никаких промежуточных преобразований энергии, никаких движущихся частей. Как заманчиво было бы установить большую батарею полупроводников прямо в топке электростанции!

Однако в наши дни такие устройства применяются лишь в маленьких приборах. Дело в том, что они пока менее экономичны, чем обычные турбины и котлы. Коэффициент полезного действия термопары — 6—8%, а в лабораторных условиях — около 10%. Это, вообще говоря, немало. Примерно таков же к. п. д. у паровоза. Но все же это в несколько раз меньше, чем к. п. д. у современных тепловых электростанций.

Физики стремятся повысить мощность и экономичность полупроводниковых термоэлектрогенераторов.

Новые холодильники

С брусочками полупроводниковых термопар можно делать странные на первый взгляд превращения. Мы нагреваем их с одной стороны, охлаждаем с другой, и они порождают электроэнергию. А что если просто пропустить через них постоянный электрический ток? Тогда они с одной стороны нагреются, а с другой охладятся, ибо внешнее электрическое поле перераспределит электроны и дырки, как бы «растянет» их в разные места. Там, где возникнет недостаток носителей тока, они начнут образовываться заново и тем самым охладят полупроводник. Там же, где носители тока будут в избытке, электроны станут воссоединяться с дырками, энергия начнет выделяться в виде теплоты. Таким образом в брусочках возникнет разность температур. Это явление называется *эффектом Пельтье*, по имени обнаружившего его ученого.

На основе этого эффекта было разработано несколько систем холодильников. В них нет ни движущихся жидкостей, ни электродвигателей, ни компрессоров. В заднюю стенку холодильного шкафа вмонтирована небольшая плитка, собранная из полупроводниковых термопар. Она соприкасается с двумя радиаторами: один выходит наружу холодильника, другой расположен внутри него. Полупроводниковый выпрямитель преобразует переменный ток электросети и питает холодильник постоянным током. Холодильник действует, совершенно не изнашиваясь. По экономичности последние модели этих устройств не уступают обычным холодильным установкам. Прочные и надежные полупроводниковые холодильники не боятся толчков, тряски.

Способность полупроводников создавать искусственный холод пригодится, конечно, не только в быту. Для научных исследований созданы холодильники-малютки размером с наперсток. Никаким другим способом их построить невозможно. Врачи получили первые экземпляры шлемов для *гипотермии* (охлаждения) мозга, которые помогут проводить сложнейшие операции. Это под силу технике наших дней.

Нагрев вместе с охлаждением

Стоит переменить направление тока через полупроводниковую батарею — и холодильник словно «выворачивается наизнанку». Там, где был недостаток носителей тока, теперь избыток, и наоборот. Тепло и холод меняются местами. Греются уже не внешние, а внутренние концы полупроводниковых брусочков. Из холодильника получается духовой шкаф. Разумеется, и эту возможность, совершенно недоступную обычным холодильным аппаратам, техника охотно использует всюду, где необходимо поддерживать постоянную температуру или попеременно разогревать и охлаждать какую-нибудь деталь. Например, герма-

ниевые полупроводниковые триоды плохо переносят изменение температуры, поэтому их полезно помещать в полупроводниковые же термостаты.

Войдя в жилой дом недалекого будущего, вы увидите под подоконниками широкие пластины радиаторов. Но ни парового, ни водяного отопления в этом доме не будет. Такие же пластины — и с наружной стороны стен. А между внутренними и внешними радиаторами будут установлены батареи полупроводниковых термопар. Пропуская через них постоянный ток в определенном направлении, мы заставим комнатный радиатор нагреваться. А летом, в жаркую погоду, ток включат в обратном направлении. Комнатный радиатор вберет теплоту окружающего воздуха и охладит помещение.

Вентильный фотоэлемент

Все фотолюбители знакомы с удобным прибором, определяющим экспозицию при съемке,— с *фотоэлектрическим экспонометром*. Вы открываете крышку прибора, направляете его «глаз» на предмет, который хотите сфотографировать, и стрелка на шкале тут же показывает, какую надо сделать выдержку. Прибор не требует никаких источников питания — батареек, аккумуляторов. Он преобразует световую энергию в энергию электрического тока, отклоняющего стрелку. Свет превращается в ток.

Чувствительный элемент экспонометра сделан из полупроводника селена, обладающего дырочной проводимостью. Он лежит на стальной подложке. На внешнюю поверхность селена нанесена тонкая пленка металла, например золота. И эта добавка превращает поверхностную область полупроводника из дырочной в электронную.

В электронной области обстрел световыми частицами (фотонами) освобождает из атомов электроны. Они мечутся, сталкиваются и, «не умещаясь» в тоненьком слое электронного селена, уходят в пленку золота. Иного пути у них нет, так как в дырочную область дорога закрыта запирающим слоем. Поэтому в пленке золота накапливается избыток электронов — отрицательный электрический заряд. Вместе с электронами в электронной области, естественно, образуется и некоторое количество дырок. Для них запирающий слой не преграда. Положительный заряд как бы «пропуск» для прохода через границу. И благодаря этому на стальной подложке возникает положительный заряд. Таким образом, энергия света создает разность потенциалов между противоположными поверхностями полупроводниковой пластинки. Если эти поверхности соединить проволочкой, возникнет электрический ток, который будет течь, пока селен освещен. И сила тока будет тем больше, чем сильнее освещение.

Такие вентильные фотоэлементы известны давно. Они широко применяются в различных автоматических устройствах: например, отлично справляются с анализом крови (фиксируют ничтожное различие

Абрам Федорович Иоффе (1880—1960)

Советский физик, академик, лауреат Государственной премии СССР, Герой Социалистического Труда, почетный член многих академий. Ранние работы Иоффе посвящены обоснованию квантовой теории света и выяснению механизма фотоэффекта. Основные его труды связаны с изучением механических свойств кристаллов, электрических свойств диэлектриков и полупроводников. Важное значение имели исследования по физике полупроводников. Иоффе был не только блестящим физиком, одаренным необычайно тонкой физической интуицией, но и выдающимся организатором: по его инициативе были созданы физические институты в важных промышленных центрах и на периферии.

в количестве красных кровяных телец), непрерывно следят за насыщенностью крови кислородом при хирургических операциях и т. д. Однако до недавних пор у полупроводниковых фотоэлементов был очень низкий к. п. д. — они преобразовывали в электрическую энергию лишь тысячные доли энергии падающего светового потока.

Свет работает

Сейчас существуют фотоэлементы, способные преобразовывать в электрический ток до 13 % энергии падающего света. Элементы эти состоят из тонких пластинок, вырезанных из крупных, специально выращенных кристаллов полупроводника кремния. Поток излучения на 1 м^2 площади поверхности прибора, освещенного солнцем, способен дать электрическую мощность до 120 Вт. В солнечный день батареи кремниевых фотоэлементов площадью в половину газетной страницы могут питать электродвигатель швейной машины.

На спутниках, ракетах, автоматических межпланетных станциях солнечные батареи дают электрический ток радиостанциям и другим приборам бортовой аппаратуры. Двигаясь к Марсу или к Венере, межпланетный корабль летит в мощном световом потоке незаходящего Солнца. При нынешнем к.п.д. солнечных батарей применение их снижает массу космического корабля. На Луне около года работал «Луноход-1», питавшийся солнечной энергией.

Следует отметить, что современные кремниевые фотоэлементы, по всей видимости, еще не самые эффективные. Ученые пытаются их усовершенствовать и, главное, ищут новые материалы, способные освоить большую долю световой энергии, чем кремний. Теоретически возможно создать полупроводниковые солнечные батареи, превращающие в электрический ток почти половину энергии падающего на них света.

Полупроводники и жизнь

Рождение солнечной энергетики — начало нового этапа в истории техники. До недавних пор лишь растения могли задерживать, накоплять и использовать энергию солнечного луча. Все запасы ископаемого топлива в конечном итоге «консервы солнечного света», заготовленные некогда зелеными листьями древних растений. С помощью полупроводников человек лишил природу этой монополии.

Между прочим, в зеленом листе, как выясняется, происходят явления, весьма схожие с теми, которые протекают в вентильных фотоэлементах. Сегодня в лабораториях с помощью окрашенных полупроводников уже осуществлен первый этап фотосинтеза — процесса, который преобразует солнечный свет в химическую энергию живого вещества, накапливает ее и питает всю органическую жизнь Земли. Перед наукой открылась заманчивая перспектива — применить искусственный фотосинтез в широких масштабах. Предстоит научиться синтезировать с помощью солнечного света сложные органические соединения прямо из простых минеральных солей воды и воздуха, минуя растения. Успехи физики полупроводников вместе с достижениями химии и биологии ведут к решению этой проблемы.

Физика полупроводников и в других областях тесно соприкасается с наукой о жизни. Электронные явления, сходные с процессами в запирающих слоях, играют огромную роль в физиологии нервной системы, а природные приспособления, подобные вентильному фотоэлементу,— в физиологии зрения.

Полупроводники приобретают большое значение и для химии. Катализ — процесс, в котором малые добавки тех или иных веществ резко ускоряют химические превращения,— оказывается, можно объяснить влиянием примесей на электронные явления в полупроводниках.

Необыкновенно широк охват учения о полупроводниках. Овладевая полупроводниками, ученые обогащают физику и химию, движут к новым высотам технику, раскрывают загадки биологии. Сегодня даже трудно вообразить в полной мере грядущее развитие физики полупроводников. С каждым годом эти замечательные материалы будут все более входить в нашу жизнь.

Звук в твердом теле

Представьте себе, что мы установили рядом две тонкие металлические пластинки и заставили их вибрировать так, как показано на рисунке 1. Пластинка *А* периодически *сжимает* близлежащие слои воздуха, повышая давление в них. Это повышение давления воздействует на более удаленные слои воздуха, и в результате в обе стороны от пластинки, перпендикулярно к ней побегут звуковые волны в направлениях *АМ* и *АК*. Из рисунка видно, что пластинка смещается в направлении распространения звуковых волн, а значит, и колебания молекул воздуха в звуковой волне происходят вдоль направления распространения звука. Такие волны называются *продольными*.

Вторая пластинка при своих колебаниях будет периодически сдвигать соприкасающиеся с ней слои воздуха за счет трения, но это движение не будет передаваться соседним слоям, так как молекулы воздуха слабо связаны друг с другом. Звуковые волны в направлениях *АМ* и *АК* от пластинки *Б* не побегут. Пластинка колеблется поперек этих направлений, а в воздухе (и вообще в газах и жидкостях) могут распространяться только *продольные волны*.

В отличие от молекул воздуха атомы твердого тела образуют кристаллическую решетку, в которой каждый атом упруго связан со своими соседями невидимыми «пружинками» электрических сил. Смещение любого атома передается всем соседним атомам кристаллической решетки, независимо от того, представляет ли это смещение продольное сжатие или поперечный сдвиг. Поэтому в твердых телах распространяются *продольные* и *поперечные* волны.

Скорость поперечных волн всегда меньше, чем продольных. Например, в сейсмограф, регистрирующий распространяющиеся в земной коре звуковые волны от землетрясений, приходят сначала продольные волны и лишь через несколько секунд — поперечные. Если скорости тех и других известны, то по разнице времени между их приходами можно определить расстояние от сейсмографа до места, где произошло землетрясение. При изучении волн от землетрясений ученые установили, что поперечные волны не проходят через центр земного шара, и сделали вывод, что внутри Земли находится жидкое ядро.

Итак, звук в твердом теле — это упругие колебания атомов (или ионов) в узлах кристаллической решетки, распространяющиеся по решетке.

А теперь забудем ненадолго о звуке и попробуем ответить на вопрос: каков механизм теплопроводности, как передается тепло от нагретых участков вещества к холодным?

Если мы нагреем газ в каком-то месте, молекулы газа в этом месте начнут двигаться быстрее, увеличат свою кинетическую энергию и при столкновениях с соседними, более медленными молекулами передадут им часть своей энергии. Те в свою очередь передадут часть своей энергии еще более далеким молекулам. Тепло в газах распространяется благодаря соударениям между молекулами. Но ведь и звуковая волна распространяется в газах благодаря соударениям молекул!

А в твердых телах? В металлах, где много свободных электронов, не связанных с атомами кристаллической решетки, механизм теплопроводности аналогичен тому, что происходит в газах, только передают друг другу кинетическую энергию не молекулы газа, а более быстрые электроны разогретых участков тела более медленным электронам соседних, холодных участков.

Как передается тепло в полупроводниках, где свободных электронов мало, или в диэлектриках, где их совсем нет? Здесь разогрев какого-то участка тела приводит к раскачке атомов в узлах кристаллической решетки и эти колебания за счет упругих электрических связей передаются соседним атомам кристаллической решетки.

А теперь перечитайте строки о распространении звука в твердом теле — и вы убедитесь, что механизм его распространения аналогичен механизму теплопроводности! Если бы мы нагрели конец идеального кристалла, обладающего геометрически правильной кристаллической решеткой, то тепло распространялось бы от нагретого конца к холодному со скоростью звука! В реальных кристаллах эти скорости несколько отличаются.

А теперь посмотрим, чем отличаются друг от друга звуковая волна в твердом теле и распространение тепла в нем. Колебания атомов в узлах кристаллической решетки при распространении звуковой волны являются *упорядоченными*, т. е. все атомы колеблются с одной и той же частотой и в одних и тех же направлениях — либо вдоль направления распространения волны, если волна продольная, либо поперек, если волна поперечная. Тепловые же колебания атомов в кристаллической решетке происходят с самыми различными частотами и *хаотически*.

Однако квантовая механика показывает, что энергия колеблющегося атома в кристалле, а значит, и частота его колебаний квантованы, т. е. могут меняться не непрерывно, а лишь порциями — *квантами*. И как уменьшение или увеличение энергии электрона в атоме приводит к излучению или поглощению кванта электромагнитной энергии — *фотона*, так и уменьшение или увеличение энергии колебаний атома в кристаллической решетке приводит к появлению или исчезновению особой частицы — кванта звуковой энергии, или *фонона*.

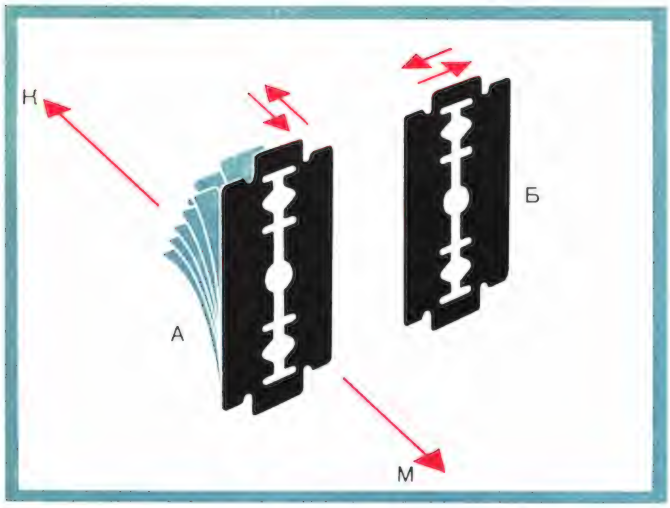


Рис. 1. Стрелки над пластинками *А* и *Б* показывают направление вибрации пластинок. В обе стороны от пластинки *А* в направлениях *АМ* и *АК* побегут звуковые волны.

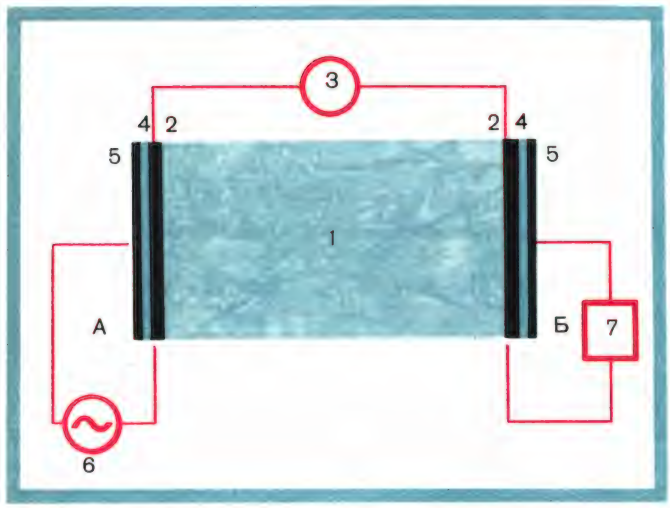


Рис. 2. Принцип усиления ультразвука: *А* — преобразователь электрических колебаний в ультразвук; *Б* — преобразователь ультразвука в электрические колебания; *1* — кристалл пьезоэлектрического полупроводника; *2* — металлические электроды, напыленные на грани кристалла; *3* — источник постоянного электрического напряжения; *4* — тонкие пленки пьезоэлектрического полупроводника; *5* — наружные металлические электроды; *6* — источник высокочастотного электрического напряжения; *7* — приемник электрических колебаний.

Вначале понятие «фонон» было введено чисто формально, для удобства математических расчетов, но потом оказалось, что без этого понятия в физике твердого тела и акустике просто не обойтись. Как представление о фотонах отражает двойственную (волновую и корпускулярную) природу света, так и представление о фононах отражает сложную, двойственную природу материи. Это представление привело к рождению *квантовой акустики*.

Теперь физики во многих случаях рассматривают и звуковые волны, и явление теплопроводности в твердых телах как потоки фононов. Например, если в твердом теле встречаются две звуковые волны, распространяющиеся под углом друг к другу, то их взаимодействие удобно рассматривать как процесс столкновения фононов с фононами. При этих столкновениях могут рождаться фононы других частот, т. е. при встрече двух звуковых волн может возникнуть новая звуковая волна другой частоты.

Фононы могут взаимодействовать внутри кристалла и с электронами, и с фотонами. Примером взаимодействия фононов с электронами является *акустоэлектрический эффект*. При распространении интенсивной ультразвуковой волны в металле или полупроводнике фононы сталкиваются с электронами, и под действием этих толчков электроны начинают двигаться в ту же сторону, что и звуковая волна. Это приводит к возникновению постоянного тока в кристалле или э. д. с. на его концах, что можно использовать, например, для измерения мощности ультразвука.

Еще интереснее проявляется взаимодействие электронов с фононами в обнаруженном совсем недавно эффекте усиления ультразвука в пьезоэлектрических полупроводниках.

Наиболее распространенные материалы для обычных пьезокристаллов (например, кварц) являются диэлектриками. Однако есть и полупроводниковые материалы, обладающие пьезоэлектрическими свойствами, например сульфид кадмия и окись цинка.

Приложим к двум противоположным граням такого кристалла постоянное электрическое поле. В кристалле при этом начнется дрейф (перемещение) электронов. Если напряженность электрического поля достаточно велика (несколько сотен В/см), то скорость дрейфа электронов превысит скорость распространения звука в данном материале. Электроны, сталкиваясь с фононами, отдают им часть своей энергии, что и приводит к усилению ультразвука.

К одной из граней кристалла присоединим источник ультразвуковых колебаний высокой частоты. Для этого достаточно напылить на грань кристалла тонкий металлический электрод, затем пленку того же CdS или ZnO и второй металлический электрод и подать на электроды высокочастотное электрическое напряжение (рис. 2). Пленка пьезоэлектрического полупроводника служит преобразователем электрических колебаний в ультразвуковую волну. Наилучшее преобразование получается при резонансной толщине пленки преобразователя, равной половине длины ультразвуковой волны в материале пленки, поэтому чем выше частота ультразвука (т. е. чем меньше его длина волны), тем тоньше дол-

жен быть преобразователь. Например, в CdS при частоте ультразвука 300 МГц длина ультразвуковой волны равна 0,015 мм. Следовательно, для получения ультразвука частотой 300 МГц необходима пленка CdS толщиной 0,0075 мм. Такой же преобразователь на второй грани кристалла служит для обратного преобразования ультразвука в электрические колебания.

Пройдя по кристаллу, длина которого всего несколько миллиметров, слабая ультразвуковая волна усиливается в десятки тысяч раз. Усиление так велико, что, если даже в кристалл не вводится ультразвуковая волна, на выходе все равно появляется ультразвуковой сигнал шумового характера — это усиливаются всегда существующие в кристалле крайне слабые тепловые колебания решетки.

Если бы пленочные преобразователи полностью преобразовывали мощность электрического сигнала в мощность ультразвуковой волны и обратно, то кристалл, изображенный на рисунке 2, оказался бы прекрасным усилителем электрических сигналов — слабый электрический сигнал преобразовывался бы первым преобразователем в ультразвук, ультразвук усиливался бы в кристалле и преобразовывался вторым преобразователем в сильный электрический сигнал. Насколько проще и надежнее был бы этот усилитель, чем современные усилители радиосигналов! Но, к сожалению, в ультразвук удается преобразовать лишь очень небольшую часть энергии электрического сигнала. Это означает, что в преобразователе сигнал ослабляется в десятки и сотни раз, а в двух преобразователях — более чем в 10 000 раз, т. е. примерно на столько же, на сколько он усиливается внутри кристалла.

Однако несколько лет назад независимо друг от друга советские и американские физики предсказали теоретически, а затем обнаружили экспериментально новый тип звуковых волн в пьезоэлектрических полупроводниках. Эти волны, названные по имени предсказавших их ученых *волнами Гуляева — Блюстейна*, распространяются в тонком поверхностном слое кристалла и позволяют преобразовать электрические колебания в ультразвук, усилить ультразвуковую волну и преобразовать ее обратно в электрические колебания с гораздо меньшими потерями.

Эффект усиления ультразвука изучается физиками и несомненно найдет важные применения в науке и технике. С помощью волн Гуляева — Блюстейна можно создать плоские передающие и приемные телевизионные экраны без электронно-лучевых трубок.

Квантовый характер звука особенно заметен на очень высоких частотах. Звук частотой выше 1 ГГц получил даже специальное название — его принято называть не ультразвуком, а *гиперзвуком*. Гиперзвук может распространяться только в твердых телах. В жидкостях он очень быстро затухает, а в газах вообще не может распространяться. В твердых телах затухание гиперзвука можно сильно уменьшить, охладив кристалл до температуры жидкого гелия. Ведь затухание гиперзвука объясняется в основном столкновениями звуковых фононов с тепловыми, а при охлаждении число этих столкновений уменьшается, беспорядочные тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки прекращаются и не мешают распространению гиперзвука, т. е. упорядоченным колебаниям тех же атомов.

Сейчас получен гиперзвук очень высоких частот — свыше 10^{11} Гц. Такой гиперзвук получают, например, с помощью электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. Конец кварцевого, рубинового или какого-либо другого кристалла вводят в полый резонатор (см. ст. «Радиофизика»). Сверхвысокочастотные колебания электрического поля в полом резонаторе преобразуются благодаря пьезоэффекту в гиперзвуковые колебания кристаллической решетки.

Исследование распространения и поглощения ультразвука и гиперзвука в твердых телах — один из важнейших методов исследования структуры и свойств этих тел.

Магнитные свойства вещества

В 1820 г. датский физик Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, помещенная вблизи проводника с током, отклоняется. Электрический ток создает вокруг себя магнитное поле.

Французский физик Ампер предположил, что внутри молекул вещества текут замкнутые кольцевые токи, которые и определяют магнитные свойства вещества. Лишь через много десятилетий ученые смогли убедиться в правоте Ампера — ведь он высказал эту блестящую гипотезу в то время, когда еще ничего не было известно о строении атома и существовании электронов.

Ток создается движением электрических зарядов, значит, и движущиеся по орбитам вокруг ядра в атоме электроны представляют собой кольцевые микротоки и они должны создавать вокруг себя магнитное поле. Каждый вращающийся вокруг ядра атома электрон является элементарным магнитиком. Для характеристики этого магнитика введено понятие магнитного момента. Магнитный момент электрона, движущегося по орбите, перпендикулярен плоскости орбиты. Обычная магнитная стрелка или катушка с током тоже обладает магнитным моментом. Если тело, обладающее магнитным моментом, свободно, оно будет поворачиваться во внешнем магнитном поле до тех пор, пока его магнитный момент не совпадет с направлением напряженности этого поля. Сила, с которой внешнее магнитное поле (например, магнитное поле Земли) стремится повернуть стрелку или какое-либо другое магнитное тело, зависит не только от напряженности внешнего поля, но и от размера и направления магнитного момента тела. Таким образом, магнитный момент является мерой взаимодействия магнитной стрелки (или вообще любого магнита, или катушки с током) с внешним магнитным полем.

При изучении магнитных свойств различных веществ внешнее поле обычно создают с помощью электромагнита.

Электромагнит очень удобен для физических экспериментов. Регулируя силу тока в его обмотках, можно создавать постоянные магнитные поля различной напряженности. Подключив к обмоткам источник переменного тока, можно создавать переменные магнитные поля: синусоидальные, импульсные и др.

Кроме движения по орбите электрон вращается вокруг своей оси, подобно волчку. Это движение называют *спином электрона*. Вращающийся вокруг своей оси электрон также создает магнитное поле, магнитный момент которого направлен вдоль оси вращения. В отличие от орбитального магнитного момента этот момент называется спиновым. Спиновые магнитные моменты двух электронов, один из которых вращается по часовой стрелке, а другой против часовой стрелки, направлены в противоположные стороны, или, как говорят, антипараллельны (рис. 1).

Конечно, сравнение электрона с вращающимся волчком довольно приблизительное. Строгое объяснение спина возможно лишь на языке квантовой механики.

Ядро атома состоит из протонов и нейтронов, которые также создают вокруг себя магнитные поля. Правда, спиновые магнитные моменты протона и нейтрона примерно в 2000 раз меньше, чем у электрона, поэтому магнитные свойства атома в целом определяются в основном свойствами его электронной оболочки.

Так как все атомы состоят из частиц, обладающих магнитными моментами, то немагнитных веществ вообще не существует в природе. Просто эти свойства проявляются у разных веществ по-разному.

Магнитный момент — это вектор, он обладает не только длиной, но и направлением. Сумма двух векторов, одинаковых по длине и антипараллельных, равна нулю.

Есть вещества, у которых сумма всех орбитальных и спиновых магнитных моментов каждого атома равна нулю. Такие вещества называются *диамагнетиками*. Например, в атоме гелия вокруг ядра вращаются два электрона, причем их магнитные моменты компенсируют друг друга, и общий магнитный момент атома равен нулю.

Диамагнетизм обнаружил в 1845 г. Майкл Фарадей. В диамагнетике, помещенном во внешнее магнитное поле, возникает внутреннее магнитное поле, противоположное внешнему, поэтому диамагнетик выталкивается из магнитного поля. Стержень из диамагнитного вещества устанавливается не вдоль силовых линий магнитного поля, как обычная магнитная стрелка, а перпендикулярно к силовым линиям. Диамагнетиками являются медь, серебро, золото, цинк, ртуть, свинец, вода, инертные газы и другие вещества.

Диамагнетизм — следствие открытого Фарадеем закона электромагнитной индукции. Индукционные токи в веществе всегда имеют такое направление, что противодействуют вызывающей их причине (это правило называют *правилом Ленца*, по имени сформулировавшего его петербургского академика Ленца).

При внесении любого вещества в магнитное поле это поле стремится повернуть электронные орбиты в атомах так, чтобы орбитальный магнитный момент каждого электрона был направлен по полю, т. е. чтобы плоскости электронных орбит стали перпендикулярны силовым линиям магнитного поля. В результате воздействия внешнего поля на орбитальное движение электронов в атомах накладывается дополнительное движение. А раз есть дополнительное движение, значит, есть и дополнительный магнитный момент. Этот дополнительный магнитный момент, согласно правилу Ленца, всегда направлен против внешнего магнитного поля.

Электроны есть в атомах любых веществ, поэтому диамагнетизм присущ всем без исключения веществам. Однако проявляется он только у диамагнети-

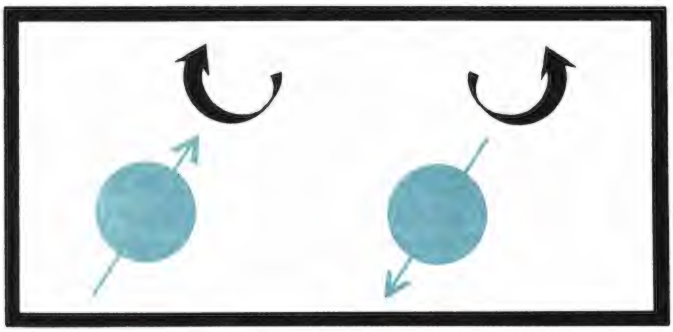


Рис. 1. Спиновые магнитные моменты (показаны голубыми стрелками) двух электронов, вращающихся в противоположные стороны, антипараллельны.

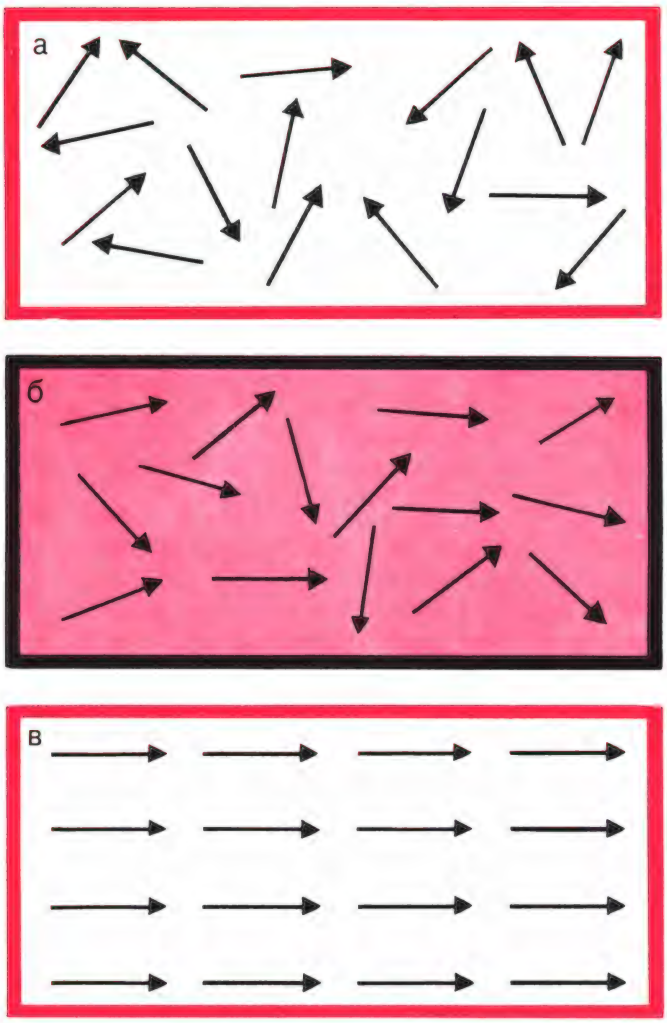


Рис. 2. Ориентация магнитных моментов атомов парамагнетика: *а* — в отсутствие внешнего магнитного поля; *б* — в магнитном поле; *в* — в сильном магнитном поле при низкой температуре.

ков, т. е. у веществ, суммарный магнитный момент атома которых равен нулю.

У всех остальных веществ диамагнетизм незаметен, так как он перекрывается значительно более сильным парамагнетизмом. У парамагнетиков суммарный магнитный момент каждого атома отличен от нуля, атомы парамагнетиков подобны миниатюрным магнитикам. При отсутствии внешнего магнитного поля ориентация этих магнитиков случайна (рис. 2, *а*), поэтому парамагнитное тело само по себе не является магнитом. Но во внешнем магнитном поле магнитные моменты атомов стремятся установиться вдоль силовых линий поля подобно магнитным стрелкам (рис. 2, *б*). Поэтому парамагнитное тело намагничивается не против поля, как диамагнетик, а по полю (рис. 2, *в*).

Хаотические тепловые колебания атомов стремятся нарушить этот порядок. При понижении температуры и увеличении напряженности внешнего поля все большее число атомов ориентируется вдоль силовых линий, пока не наступит насыщение — все магнитные моменты атомов будут направлены строго вдоль силовых линий внешнего поля.

К парамагнетикам относятся магний, кальций, хром, алюминий, марганец, молибден, платина и др. Все это слабомагнитные вещества.

Сильномагнитные вещества получили название *ферромагнетиков*. Из химических элементов ферромагнитными свойствами обладают железо, никель, кобальт, гадолиний, а при очень низких температурах также эрбий, диспрозий и другие редкоземельные металлы. Кроме того, существует множество сплавов и соединений с ферромагнитными свойствами. Есть даже ферромагнитные сплавы, состоящие из неферромагнитных элементов. Все известные в настоящее время ферромагнитные тела кристаллические.

Ферромагнетизм, как и парамагнетизм, обусловлен магнитными моментами электронов в атомах. Но в парамагнетике магнитное взаимодействие между соседними атомами слабое, поэтому при отсутствии внешнего поля магнитные моменты атомов имеют всевозможные направления. В ферромагнетиках же благодаря особому строению электронных оболочек их атомов соседние атомы сильно влияют друг на друга, и в результате их взаимодействия спиновые магнитные моменты в атомах устанавливаются параллельно друг другу. То, что ферромагнетизм обусловлен в основном не орбитальными, а именно спиновыми магнитными моментами электронов, доказали в 1915 г. с помощью очень остроумного эксперимента А. Эйнштейн и В. де Гааз.

Кусок железа или другого ферромагнитного вещества самопроизвольно разбивается на отдельные маленькие намагниченные области — *домены*. Внутри каждого домена все спиновые магнитные моменты параллельны друг другу, поэтому каждый домен является маленьким магнитиком. Домены мож-

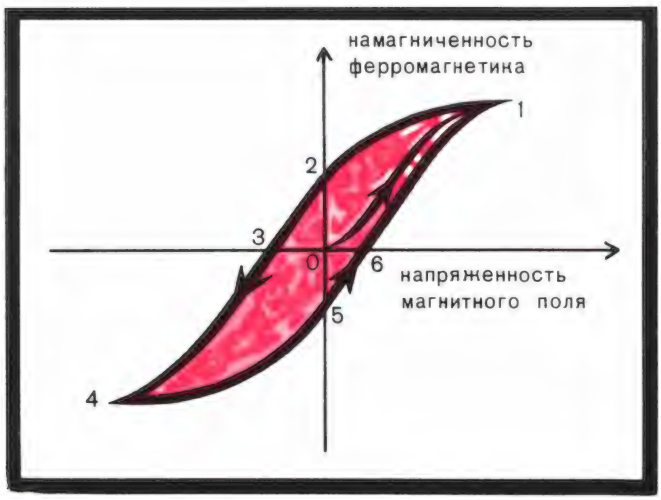


Рис. 3. Петля гистерезиса ферромагнетика. Намагничивание ферромагнитного материала, впервые помещенного в магнитное поле, происходит вдоль линии *01*. В точке *1* наступает насыщение. При намагничивании в противоположном направлении насыщение наступает в точке *4*. Отрезки *02* и *05* на вертикальной оси характеризуют величину остаточной намагниченности, а отрезки *03* и *06* на горизонтальной оси — коэрцитивную силу.

но увидеть. Если ферромагнитный кристалл с хорошо отполированной поверхностью поместить в жидкость со взвешенными в ней частичками мелкого ферромагнитного порошка, то порошок не осядет на полированную поверхность кристалла равномерно, а образует так называемые порошковые фигуры, повторяющие расположение доменов.

Кусок железа состоит из большого числа доменов, которые при отсутствии внешнего магнитного поля ориентированы по-разному, поэтому при отсутствии внешнего поля железо немагнитно. При наложении поля домены, направление намагниченности которых близко к направлению силовых линий поля, начинают расти, а размеры доменов, намагниченных против внешнего поля, уменьшаются, и, наконец, эти домены совсем исчезают. При дальнейшем увеличении напряженности внешнего поля домены, направление которых было близко к направлению внешнего поля, поворачиваются и устанавливаются точно вдоль силовых линий внешнего поля. Наступает насыщение — при дальнейшем увеличении напряженности внешнего поля намагниченность ферромагнетика почти не растет.

Если теперь уменьшить напряженность внешнего поля до нуля, то ориентация доменов нарушится лишь частично, поэтому намагниченность ферромагнетика уменьшается, но не до нуля. Чтобы уничтожить остаточную намагниченность образца, нужно приложить внешнее поле противоположного направления. Напряженность поля, при которой остаточная намагниченность становится равной нулю, называется *коэрцитивной силой*. Если увеличивать обратное поле, то наш образец намагнитится в противоположном направлении до насыщения. При возврате к начальному направлению поля зависимость намагниченности образца от напряженности внешнего поля опишет петлю, называемую *петлей гистерезиса* (рис. 3).

Материалы с большой коэрцитивной силой размагнитить трудно. Такие материалы имеют широкую петлю гистерезиса и называются *магнитожесткими*. Из них изготовляют постоянные магниты. Материалы с малой коэрцитивной силой и узкой петлей гистерезиса называют *магнитомягкими*. Из магнитомягких материалов изготовляют сердечники трансформаторов, статоры и роторы электромоторов и генераторов электрического тока.

Теперь вам не трудно будет ответить на вопрос: «Почему магнит притягивает кусок ненамагниченного железа?» Оказавшись в магнитном поле, железо намагничивается: на ближайшем к южному полюсу магнита конце железного куска возникает северный полюс, а на дальнем — южный. Разноименные магнитные полюсы притягиваются (а одноименные отталкиваются), причем сила притяжения (или отталкивания) по закону Кулона обратно пропорциональна квадрату расстояния между полюсами. Так как разноименные полюсы расположены ближе друг к другу, чем одноименные, сила притяжения превосходит силу отталкивания.

Для каждого ферромагнетика существует температура (называемая точкой Кюри), выше которой его ферромагнитные свойства исчезают, так как параллельная ориентация спиновых магнитных моментов нарушается под действием интенсивных тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Для железа точка Кюри равна 768° С, для никеля 358° С, для кобальта 1120° С, а для гадолиния 17° С. При температуре выше точки Кюри ферромагнетик становится парамагнетиком.

Отметим еще, что при наложении магнитного поля ферромагнитный образец чуть-чуть изменяет свои размеры — это явление называется *магнитострикцией*. Если внешнее магнитное поле изменять с определенной частотой, то и размеры образца будут колебаться с той же частотой. Это явление напоминает колебания пьезоэлектрической пластинки в переменном электрическом поле (см. ст. «Звук») и используется в тех же целях — для генерации ультразвука.

В твердых телах атомы расположены близко друг к другу, поэтому магнитные свойства тел зависят не только от магнитных свойств отдельных атомов, но и от взаимодействия атомов друг с другом. В ферромагнетиках это взаимодействие приводит к параллельной ориентации спиновых магнитных моментов. Но есть вещества, в которых спиновые магнитные моменты ориентируются антипараллельно (рис. 4). Такие вещества называются *антиферромагнетиками*.

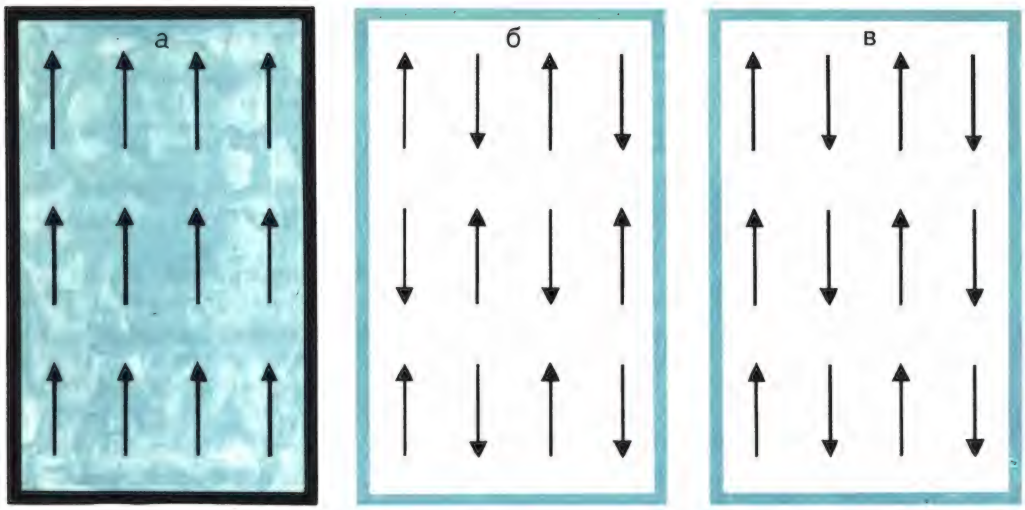


Рис. 4. Ориентация спинов при температуре, близкой к абсолютному нулю: *а* — в ферромагнетике; *б* и *в* — в антиферромагнетике.

Антиферромагнетик не обладает магнитным моментом, так как спиновые магнитные моменты всех электронов в нем скомпенсированы, т. е. дают в сумме нуль. Эта упорядоченная ориентация спиновых магнитных моментов разрушается при высоких температурах, поэтому каждый антиферромагнетик, как и ферромагнетики, имеет антиферромагнитную точку Кюри (ее называют еще точкой Нееля), выше которой антиферромагнетик превращается в парамагнетик.

Антиферромагнетиками являются окись хрома Cr_2O_3, соединения марганца с кислородом MnO_2, селеном MnSe, теллуром MnTe, мышьяком MnAs и многие другие вещества.

Кристаллическая решетка антиферромагнетика как бы состоит из двух подрешеток, намагниченных в одинаковой степени, но в противоположных направлениях (рис. 5, *а*). Поэтому суммарная намагниченность равна нулю. Однако существуют соединения, кристаллическая решетка которых также состоит из двух подрешеток, но с различной по величине намагниченностью (рис. 5, *б*). Магнитные свойства таких веществ, называемых *ферримагнетиками,* похожи на свойства ферромагнетиков.

К классу ферримагнетиков относятся ферриты, т. е. химические соединения окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов — никеля, кобальта, магния, меди, марганца и др.

Ферриты сочетают в себе свойства ферромагнетиков и полупроводников, что позволяет применять их на высоких и сверхвысоких частотах. Если бы сердечник обычного трансформатора был изготовлен из цельного куска железа, значительная часть электрической мощности бесполезно расходовалась бы на нагрев сердечника вихревыми токами Фуко, которые по закону электромагнитной индукции возбуждаются в металле сердечника при изменении силы электрического тока в обмотках трансформаторов. Поэтому сердечники обычных трансформаторов набирают из изолированных друг от друга стальных пластин, для того чтобы пресечь путь токам Фуко и снизить потери электроэнергии. Но на высоких частотах потери на токи Фуко даже в тонких стальных пластинках велики, поэтому для сердечников высокочастотных трансформаторов нужны ферромагнитные материалы с большим электрическим сопротивлением. Такими материалами и являются ферриты, сопротивление которых в миллионы раз больше, чем у металлических ферромагнетиков. А чем больше сопротивление материала сердечника, тем меньше сила токов Фуко.

Промышленность выпускает много марок ферритов с различными свойствами и составом.

Вы познакомились с различными типами магнитных материалов, многие из которых широко применяются в науке и технике. Сердечники трансформаторов и электромагнитов; постоянные магниты во всевозможной электроизмерительной аппаратуре; тонкие ферромагнитные пленки для записи и хранения информации; магнитострикционные излучатели и приемники ультразвука... Существуют методы магнитной дефектоскопии, основанные на изучении особенностей намагничивания тел, обладающих внутренними дефектами; методы магнитной разведки для поисков железных руд...

С помощью магнитных полей фокусируют потоки заряженных частиц — от потока электронов в электронно-лучевых трубках телевизоров и осциллографов до потока протонов в одном из крупнейших в мире ускорителей — Серпуховском синхрофазотроне, основой которого служит кольцевой электромагнит длиной 1,5 км, массой более 20 000 т.

Ферритовые кольца широко применяются в запоминающих устройствах современных вычислительных машин. Простейшим элементом памяти служит ферритовое колечко с несколькими обмотками. Если пропустить импульс электрического тока по одной из обмоток, колечко намагнитится в определенном направлении и останется намагниченным и после прекращения тока, т. е. запомнит импульс. Импульс обратной полярности намагнитит ферритовое колечко в противоположном направлении. Значит, колеч-

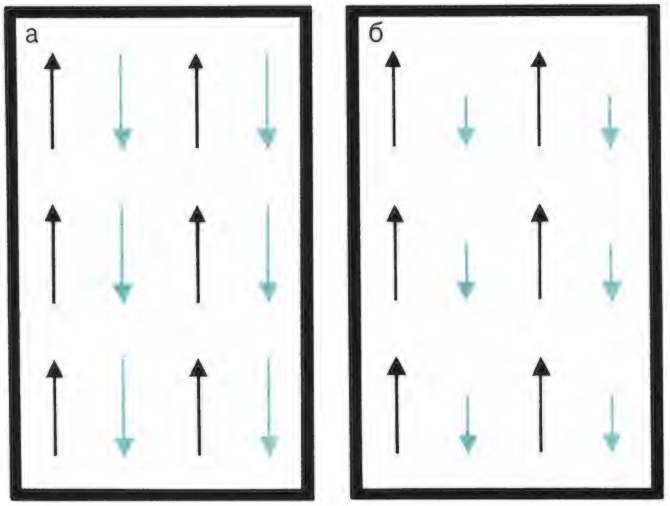


Рис. 5. Антиферромагнетики и ферримагнетики: *а* — кристаллическая решетка антиферромагнетика состоит из двух подрешеток, намагниченных в противоположных направлениях в одинаковой степени; *б* — в ферримагнетиках кристаллическая решетка состоит из двух подрешеток, с различной по величине намагниченностью.

ко может запоминать одно из двух состояний, что обеспечивает возможность записи чисел в двоичной системе счисления. Считывание записанной информации осуществляется с помощью других обмоток того же колечка. Запоминающее устройство вычислительной машины состоит из десятков тысяч таких колечек, обмотки которых соединены друг с другом и с другими узлами машины.

Применение находят не только ферромагнетики и ферриты. Диамагнитные свойства плазмы используются для удержания плазмы в магнитных ловушках. Как диамагнитное вещество, плазма выталкивается из магнитного поля и не может выйти из области, окруженной со всех сторон сильным магнитным полем (см. ст. «Плазма и термоядерный синтез»).

Большое научное и практическое значение имеет изучение электронного парамагнитного резонанса (или просто ЭПР), т. е. избирательного поглощения электромагнитных волн определенной частоты в парамагнитном веществе, находящемся в магнитном поле. Явление ЭПР было открыто в 1944 г. советским физиком Е. К. Завойским. Частота поглощаемых волн зависит от напряженности внешнего магнитного поля и состава исследуемого вещества и обычно лежит в пределах 1—100 ГГц (10^9—10^{11} Гц), т. е. в диапазоне сверхвысоких частот. Исследование спектров ЭПР является одним из методов радиоспектроскопии (см. ст. «Радиофизика»). Метод этот очень чувствителен, он позволяет обнаружить некоторые химические соединения, если на каждые 100 млрд. молекул основного вещества приходится хотя бы одна молекула этих соединений.

Поглощение электромагнитных волн при ЭПР вызывается расщеплением энергетических уровней атомов во внешнем магнитном поле на магнитные подуровни, т. е. эффектом Зеемана. Поглощение носит квантовый характер, т. е. поглощаются кванты электромагнитного излучения, энергия (а значит, и частота) которых соответствует разнице энергий между магнитными подуровнями атомов. Поглотив квант электромагнитного излучения, атом переходит с нижнего магнитного подуровня на верхний.

Американский физик Н. Бломберген предложил использовать диамагнитные кристаллы с примесью парамагнитных ионов для создания квантовых парамагнитных усилителей радиосигналов, или мазеров. Большинство современных квантовых усилителей диапазона сверхвысоких частот изготовлено из рубина, т. е. диамагнитного кристалла корунда Al_2O_3 с примесью парамагнитных ионов хрома. В этих кристаллах удается создать инверсную населенность магнитных подуровней, т. е. перевести большую часть ионов хрома на магнитные подуровни с более высокой энергией. При прохождении через такой кристалл радиосигнала с частотой, соответствующей энергии перехода между магнитными подуровнями, ионы хрома переходят с верхнего магнитного подуровня на нижний, а выделяющаяся при этом энергия приводит к усилению радиосигнала.

Изменяя напряженность внешнего магнитного поля, можно менять расстояние между магнитными подуровнями, т. е. настраивать квантовый усилитель на нужную частоту.

Инверсную населенность магнитных подуровней в кристаллах рубина удается создать лишь при очень низких температурах. Обычно кристалл помещают в криостат, т. е. в сосуд с жидким гелием, где рубин охлаждается до температуры 4,2 К.

Квантовые парамагнитные усилители по чувствительности не имеют себе равных. Они широко используются в дальней космической связи и радиоастрономии.

Подошло к концу наше путешествие в удивительный мир твердых тел. Многие его загадки уже решены, свойства твердых тел широко используются в науке и технике. Но мир твердых тел таит в себе еще много загадок, много новых возможностей.

Как и из чего вещество построено

Законы, управляющие Вселенной

Вы, конечно, много раз слышали о законе сохранения энергии и, наверное, помните, что есть закон сохранения количества движения.

Из этой статьи вы узнаете более подробно об этих и других законах сохранения, а главное, узнаете, что законы сохранения возникают как следствие простых свойств пространства и времени.

Вы узнаете, что такое однородность хода времени, зеркальная симметрия пространства, антивещество и антимиры.

Закон сохранения энергии

Энергия не исчезает, а только превращается из одной формы в другую.

Вы хорошо знаете, что кинетическая энергия может превращаться в потенциальную. Самый простой пример — камень, подброшенный вверх. В верхней точке, когда камень на мгновение останавливается, кинетическая энергия переходит в потенциальную.

Но вот более интересный пример. Очень легко самому сделать игрушку, которая на первый взгляд нарушает закон сохранения энергии. Снаружи это просто круглая банка из-под какао. Вы кладете ее на пол и толкаете. Она проходит некоторое расстояние и останавливается. Но сразу после остановки, к удивлению зрителей, она начинает катиться обратно. Подумайте, в чем здесь дело. Может быть, вы сами придумаете, как сделать эту игрушку. Вот как она устроена. По оси банки проходит жгут из резинок, таких, какие используются для моторчиков авиамоделей. Концы жгута прикреплены к дну и крышке банки. К середине жгута привязан на веревочке свинцовый грузик. Когда банка катится, грузик висит вертикально и резина при вращении банки закручивается. Кинетическая энергия банки переходит в потенциальную энергию закручивания резины, и банка останавливается. После остановки резина раскручивается и приводит в движение банку. Энергия из потенциальной снова превратилась в кинетическую.

Для проверки закона сохранения энергии нужно убедиться, что при обратном движении банки кинетической энергии оказалось столько же, сколько было вначале. Конечно, при этом всегда получается нехватка, часть энергии из-за трения переходит в тепло.

Как установить, что энергия, которая перешла в тепло, в точности равна нехватке кинетической

Как устроена банка-бумеранг? Кинетическая энергия банки переходит в энергию закручивания резины — банка останавливается. После остановки резина раскручивается и снова приводит банку в движение. Банка возвращается обратно.

энергии? Как сравнить тепловую и механическую энергии? Ведь вернуть тепловую энергию обратно в кинетическую не так легко, как в случае потенциальной энергии.

Для установления закона сохранения энергии нужно доказать, что при любом способе превращения определенного количества механической энергии в тепловую выделяется одно и то же количество тепла и, наоборот, когда совершается работа за счет охлаждения, это количество тепла переходит в такое же количество механической энергии.

Как вы знаете из школьного курса физики, начало этому доказательству было положено в прошлом веке физиками Робертом Майером и Джеймсом Джоулем.

С тех пор закон сохранения энергии был точно проверен не только для перехода механической энергии в тепловую, но и для перехода в химическую энергию и в электромагнитную энергию, а также для перехода электрической или химической энергии в тепловую.

Какие бы явления ни изучались, каждый раз кажущееся несохранение энергии на самом деле означало переход энергии из одной формы в другую.

И все-таки в 30-х годах XX в. физики усомнились в правильности закона сохранения энергии. Было изучено явление радиоактивного распада. Обнаружили, что энергия электронов, вылетающих в результате распада, всегда меньше, чем разность энергий ядер до и после распада.

Закон сохранения энергии был спасен следующим способом. Предположили, что наряду с электроном при радиоактивном распаде вылетает нейтрино — нейтральная частица, которая почти не взаимодействует с веществом и поэтому, не останавливаясь, вылетает из установки, унося с собой излишек энергии. Измерили даже количество движения ядра, которое возникает после вылета нейтрино в результате отдачи. Однако для окончательного доказательства существования нейтрино нужно было увидеть непосредственное действие нейтрино на вещество. Такой опыт был сделан в 1953 г. физиками Ф. Райнесом и К. Коуэном. Поток нейтрино, которые получались в результате радиоактивного распада ядер в ядерном реакторе, падал на воду. Нейтрино взаимодействовали с ядрами водорода (протонами), и получались нейтроны и позитроны. Эту реакцию можно было установить, наблюдая γ-кванты, которые возникают при взаимодействии образующихся позитронов с электронами окружающего вещества.

Закон сохранения энергии вытекает из равномерности хода времени.

В чем же причина такого общего свойства природы? Почему закон сохранения энергии выполняется с такой большой точностью во всех известных случаях? Не может ли оказаться, что мы найдем такое явление, где энергия не будет сохраняться? Это настолько важные вопросы, что необходимо понять, не связан ли закон сохранения энергии с другими общими свойствами природы. Оказывается, закон сохранения энергии является строгим следствием равномерности хода времени.

Что же такое ход времени и что означает его равномерность? Ход времени определяется относительной скоростью протекания различных процессов в природе. Время прохождения космическим кораблем расстояния от Земли до Луны можно сравнить с временем прохождения того же расстояния светом. Ход стрелки часов можно определить числом периодов колебаний света, излучаемого атомом за время перемещения стрелки на одно деление. Любое измерение интервала времени означает сравнение ритмов разных процессов.

Если бы все явления в природе изменили одинаково свой ритм, то изменился бы только масштаб измерения времени, и этого никак нельзя было бы заметить.

Равномерность хода времени означает, что всегда — и сегодня, и завтра, и через год — относительная скорость протекания всех процессов в природе одинакова.

Если какая-либо машина или лабораторная установка в этом году работает не так, как в прошлом, то нам всегда удается это объяснить износом деталей или изменением климата, но не изменением в ходе времени.

Равномерность хода времени установлена с колоссальной точностью на примере излучения атомов.

Атомы далеких звезд излучают свет таких же длин волн, как и атомы сегодняшнего дня, даже если свет этот был излучен миллиард лет тому назад.

Все известные нам законы природы, в том числе и биологические, подтверждают равномерность хода времени.

Мы не будем приводить строгого доказательства того, что закон сохранения энергии вытекает из равномерности хода времени. Поясним лишь, как неравномерность хода времени приводит к несохранению энергии. Допустим, что неравномерность хода времени проявилась в том, что в некоторый момент времени начала периодически изменяться константа всемирного тяготения. Тогда мы могли бы извлекать энергию. Для этого надо было бы поднимать грузы вверх в период слабого тяготения и сбрасывать их в период более сильного тяготения. Мы получили бы выигрыш в кинетической энергии. Вы видите, что неравномерность хода времени, т. е. изменение относительного ритма разных процессов, приводит к нарушению закона сохранения энергии.

Теперь не так странно, что закон сохранения энергии выполняется во всех явлениях природы. Ведь он вытекает из такого общего свойства нашего мира, как равномерность хода времени.

Закон сохранения количества движения

Различные точки пространства ничем не отличаются. Отсюда следует закон сохранения количества движения.

Давайте построим какую-нибудь машину или какую-нибудь игрушку и посмотрим, как она работает. Перенесем ее с одного места на другое. Она будет работать точно так же, если не изменятся внешние условия. Если и приемник и радиопередатчик перенести на другое место в те же условия, качество приема не изменяется. Ручные часы на Земле работают так же, как и на Луне, если ввести маленькую поправку за счет различия силы тяжести (согласно теории тяготения Эйнштейна, сила тяжести слегка влияет на ход часов). Этот закон, который можно назвать свойством однородности пространства, физики проверили на многих примерах, пользуясь точными измерительными приборами.

Из однородности пространства строго можно вывести закон сохранения количества движения, подобно тому как из равномерности хода времени следует закон сохранения энергии.

Значит, и этот закон, как и закон сохранения энергии, должен выполняться для всех явлений природы, поскольку он вытекает из такого общего свойства природы, как однородность пространства.

Что же сохраняется?

Как изменился наш взгляд на закон сохранения вещества? Масса не сохраняется. Химические элементы переходят один в другой при ядерных реакциях. Что же сохраняется?

Когда М. В. Ломоносов и А. Лавуазье формулировали закон сохранения вещества, они представляли себе этот закон как закон сохранения массы. Полная масса всех составных частей в начале химической реакции равняется массе в конце ее, какие бы реакции ни происходили. Кроме того, в химических реакциях не изменяется количество атомов любого участвующего в реакции элемента — атомы элементов только переходят от одной молекулы к другой.

В XX в. этот закон был существенно уточнен, так как во многих случаях в простой форме он оказывался неправильным. Разберем нарушение этого закона на примере превращения водорода в гелий.

Ядро атома гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов. Проследим за реакцией образования ядра гелия. Такую реакцию можно осуществить в два этапа. Сначала, облучая водород нейтронами, можно получить дейтрон — ядро, состоящее из нейтрона и протона. Когда к такому ядру присоединяется электрон, получается атом водорода, но с массой, в два раза большей массы обычного атома. Если облучить воду, содержащую тяжелый водород (тяжелую воду), дейтронами, то будут получаться ядра гелия. При этом выделяется громадная энергия, которая уходит в форме γ-квантов, т. е. в форме электромагнитных волн. Откуда эта энергия берется? Ядерные частицы — нейтроны и протоны — притягиваются друг к другу ядерными силами, которые действуют только на малых расстояниях (приблизительно 10^{-13} см), зато на этих расстояниях они несравненно больше всех других известных нам сил. Ядерное притяжение двух протонов больше, чем их кулоновское отталкивание, в 10^{40} раз.

При соединении нейтрона и протона в дейтрон эти частицы ускоряются, а всякая заряженная ча-

стица при ускорении излучает электромагнитные волны.

Итак, было два протона и два нейтрона, а получилось ядро гелия и громадная энергия, которая выделилась в форме γ-квантов.

Вот тут и потерялась масса. Масса протона равна $M_p = 1{,}00728$, а масса нейтрона $M_n = 1{,}00867$, масса ядра гелия $M_{\text{He}} = 4{,}00273$. Здесь выбрана такая единица массы, при которой атомная масса изотопа углерода ^{12}C равна 12. Следовательно,

$$2(M_p + M_n) = M_{\text{He}} + M_\gamma$$
$$2(1{,}00728 + 1{,}00867) = 4{,}03190 = 4{,}00272 + M_\gamma.$$

Если массу приписывать только нейтрону, протону и гелию, то закон сохранения массы нарушится. Для спасения этого закона нужно приписать массу также и γ-квантам. Мы столкнулись с частным случаем общего закона природы, открытого Эйнштейном: *масса тела изменяется с изменением его энергии, в какой бы форме эта энергия ни содержалась. Масса* (M) связана с *энергией* (E) следующей формулой:

$$M = \frac{E}{c^2}.$$

Здесь c — скорость света, поэтому и M_γ — масса γ-квантов равна:

$$M_\gamma = \frac{E_\gamma}{c^2},$$

где E_γ — энергия γ-квантов.

Теперь закон сохранения массы восстановился, или, лучше сказать, объединился с законом сохранения энергии. В самом деле, если покоящемуся протону приписать энергию E_p, а нейтрону — E_n, то, умножая формулу для равенства масс на c^2, получим закон сохранения энергии:

$$2(E_p + E_n) = E_{\text{He}} + E_\gamma.$$

Заметим, что в реакции электрический заряд двух протонов как раз равен заряду He (нейтрон — частица, не имеющая заряда).

Кроме того, число ядерных частиц слева равно числу ядерных частиц справа. Чтобы подчеркнуть эти законы сохранения, ядерную реакцию записывают в виде:

$$2\,{}^1_1p + 2\,{}^1_0n = {}^4_2\text{He} + \gamma.$$

Верхние значки дают число ядерных частиц, участвующих в реакции, а нижние — электрический заряд, выраженный через заряд электрона. Сумма верхних значков слева и справа равна так же, как и сумма нижних.

Таким образом, закон сохранения массы после того, как была установлена связь массы с энергией, превратился в закон сохранения энергии. Что же касается сохранения химических элементов, то этот закон совсем не соблюдается в ядерных реакциях (водород превратился в гелий). Вместо этого закона действуют во всех случаях два закона сохранения: закон сохранения заряда и закон сохранения числа ядерных частиц, который называется *законом сохранения барионного заряда.*

Закон сохранения странности

Медленный распад противоречит быстрому рождению.

Кроме перечисленных законов сохранения в ядерных реакциях выполняется еще один закон, который звучит очень странно,— *закон сохранения странности.*

Физики очень давно начали изучать космические лучи с помощью камеры Вильсона. Заряженные частицы на своем пути в камере ионизируют атомы, и на получающихся ионах высаживаются капельки воды. Получается туманный след проходящей частицы. Было установлено, что космические лучи состоят из легких частиц — электронов и фотонов и из более тяжелых частиц — протонов и мезонов. Есть даже в небольшом количестве и ядра более тяжелых элементов. Если в камеру Вильсона поместить свинцовую пластину, то можно наблюдать вторичные частицы, которые возникают в свинце под действием космических частиц. При изучении этих вторичных частиц были обнаружены следы, имеющие вид двузубой вилки — из одной точки расходилось два следа. Их надо было объяснить тем, что какая-то нейтральная частица, которая не оставляет следа в камере Вильсона, распадается на две заряженные. Далее обнаружилось, что есть по крайней мере два сорта таких нейтральных частиц — одни распадаются на протон и отрицательный пион (π-мезон), а другие — на положительный и отрицательный пионы. Частица первого типа, поскольку она дает при распаде протон, имеет барионный заряд, равный единице (барионный заряд протона). Она была названа λ-частицей или λ-барионом. Вторая частица имеет барионный заряд, равный нулю, и называется K^0-мезоном.

По расстоянию от места образования (свинцовой пластинки) до начала вилки можно было судить о времени жизни этих частиц. Оно оказалось очень большим: 10^{-8} с, тогда как время, характерное для сильных ядерных взаимодействий,— порядка 10^{-23} с. Здесь и выступила странность этих частиц. На пер-

вый взгляд ничего странного — есть же ядерные частицы, которые долго живут. Например, нейтрон, который распадается на протон, электрон и антинейтрино (нейтральная частица с массой, равной нулю), живет приблизительно 10 мин. Однако при более внимательном анализе такое большое время жизни λ- и K^0-частиц вызывает серьезное недоумение. Действительно, λ- и K^0-частицы возникают при облучении протонов отрицательными пионами. При этом они образуются в таком большом количестве, которое соответствует сильному взаимодействию этих частиц с протонами и пионами. Но тогда они должны были бы и распадаться в соответствии с этим сильным взаимодействием за время порядка 10^{-23} с. Физикам понадобилось два года, чтобы разгадать эту загадку.

Всегда, когда не осуществляется какой-либо процесс, который по всем известным законам сохранения мог бы происходить, физики обнаруживали новый закон сохранения, который запрещает процесс. Закон сохранения, который запрещает λ- и K^0-частицам быстро распадаться, называется законом сохранения странности. λ- и K^0-частицам приписывается еще один «заряд» — странность. K^0-частица имеет странность, равную $+1$, странность λ-частицы равна -1. Протон, нейтрон, пион не странные частицы (их странность равна нулю). В сильных ядерных взаимодействиях странность сохраняется; это означает, что алгебраические суммы странностей в начале и конце реакции равны.

В отличие от закона сохранения барионного и электрического зарядов закон сохранения странности неточный — он нарушается в слабых взаимодействиях, тех самых, которые ответственны за β-распад и, в частности, за распад нейтрона. Поэтому λ- и K^0-частицы все же распадаются, несмотря на то что странность в конце реакции равна нулю. Но поскольку в сильных взаимодействиях странность сохраняется, эти частицы живут не 10^{-23}, а $10^{-8} — 10^{-10}$ с.

Так как λ- и K^0-частицы рождаются в большом количестве, т. е. за счет сильных взаимодействий, то странность при их рождении должна сохраняться. Мы вынуждены прийти к заключению, что они рождаются парами, например при облучении протонов отрицательными пионами получаются сразу K^0- и λ-частицы. Формула для этой реакции выглядит так:

$$p + \pi = \lambda + K^0.$$

Суммарная странность справа и слева равна нулю.

Было изучено много различных ядерных реакций с участием странных частиц. Найдены и другие странные частицы кроме λ- и K^0-частиц. Но во всех случаях оказалось, что странность сохраняется в сильных взаимодействиях.

Почему у людей сердце с одной стороны

Наше пространство имеет еще одно свойство, которое называют зеркальной симметрией. Вот что это означает. Если две машины отличаются только тем, что одна есть зеркальное отражение другой, то такие две машины работают одинаково.

Возьмите винт и посмотрите в зеркало. Вы увидите, что в зеркале правый винт превратился в левый. Зеркальная симметрия пространства означает, что часы, построенные на левых винтах, будут иметь точно такой же ход, как и часы, в которых, как обычно, все винты правые (т. е. часы, отличающиеся друг от друга как зеркальные отражения, идут одинаково).

Казалось бы, этот закон нарушается в повседневной жизни. У людей, например, сердце с левой стороны. Для соблюдения зеркальной симметрии должно было быть равное количество левосердечных и правосердечных людей. Однако при более внимательном взгляде противоречие разъясняется.

Прежде всего, можно рассматривать не такой сложный объект, как человек. Существует, например, два типа кварца; один из них по своему молекулярному строению является зеркальным подобием другого, как правая и левая рука. Эти два типа кварца встречаются на Земле в различных количествах. То же относится и к другим минералам. Поэтому нарушение зеркальной симметрии в живой природе можно объяснить тем, что пища или «строительный материал», встречающийся в природе, не имеет зеркальной симметрии. Тогда вопрос сводится к более простому нарушению зеркальной симметрии в мертвой природе.

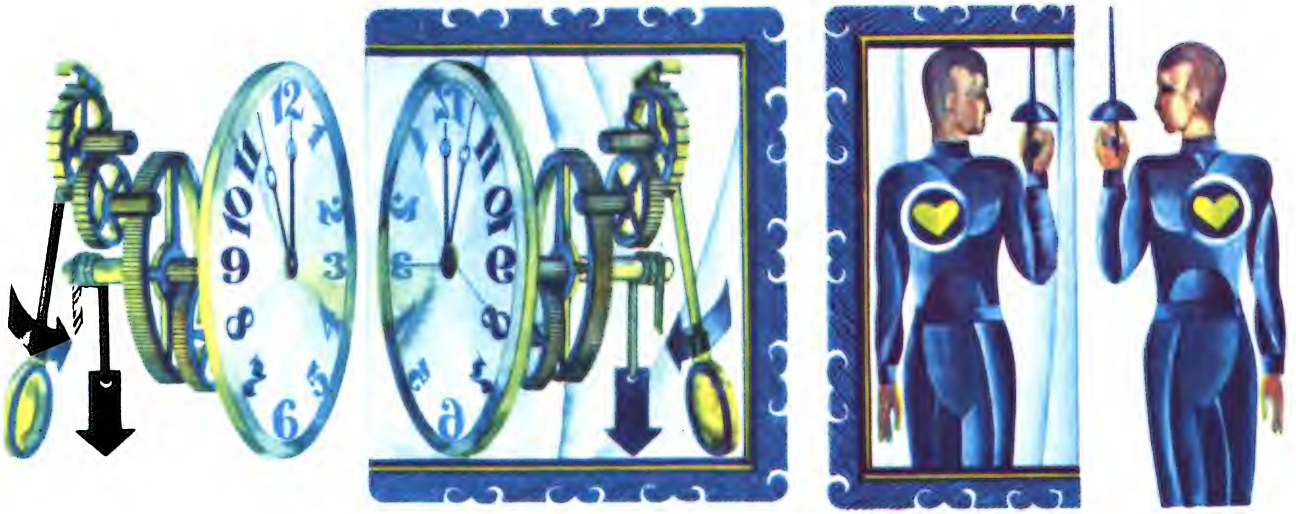
В связи с этим следует вспомнить об одном удивительном опыте Луи Пастера, который первым обнаружил, что могут существовать две зеркально симметричные формы одного и того же вещества.

Было известно, что свет, проходя через виннокаменную кислоту, встречающуюся в природе, изменяет направление поляризации. *Направление поляризации* — это направление электрического поля в световой волне.

После того как свойства естественной виннокаменной кислоты были хорошо изучены, химики получили искусственную виннокаменную кислоту. По всем физическим и химическим свойствам она не отличалась от виннокаменной кислоты, встречающейся в природе. Но когда через искусственную кислоту пропустили *поляризованный свет* (свет с постоянным

Часы, сделанные по образцу зеркального отражения обычных часов, должны иметь такой же ход.

Если все законы природы зеркально симметричны, то почему у людей сердце с левой стороны?



направлением поляризации), то обнаружилось, что, в отличие от естественной кислоты, свет не изменяет направления поляризации.

Пастер предположил, что искусственная кислота представляет собой смесь двух зеркально различных форм. Один тип кислоты поворачивает направление поляризации направо, а другой — налево; в результате направление поляризации не изменяется. Для доказательства этой гипотезы Пастер вырастил в искусственной кислоте колонию микробов, которые пожирают виннокаменную кислоту. Пастер рассуждал следующим образом: микробы приучены к поглощению той кислоты, которая есть в природе, поэтому оставшаяся часть искусственной кислоты будет

Много ли энергии мы истратили?

Начиная с того далекого дня, когда наш неведомый первобытный предок сумел зажечь первый в истории человечества костер, с тех самых пор мы не можем обойтись без энергии. Сначала мы пользовались только лишь энергией Солнца, пойманной и запасенной зеленым листом.

Потом стали расходовать ее запасы в угле и нефти. Научились строить плотины и заставили работать падающую воду. Но когда возникло опасение, что запасов солнечной энергии на нашей планете скоро людям не хватит, были освобождены неисчерпаемые запасы энергии атомного ядра.

Сколько же энергии израсходовало человечество за все свое разумное существование? Наверно, очень много?

Много или мало — судите сами. Все зависит от того, как считать и как мерить.

Энергетики дают такую оценку: всего за все свое существование люди истратили немногим более... тридцати тонн энергии.

Можно ли измерять энергию в тоннах? Конечно, можно. Для этого необходимо вспомнить формулу Эйнштейна $E=mc^2$, связывающую массу и энергию.

Очень важно, как возрастала потребность человечества в энергии. Сначала люди были экономны. Примерно четвертая часть — более семи тонн — была истрачена с начала первобытной истории до 1900 г. Этой энергии хватило, наверное, не менее чем на сотню тысяч лет — никто не может определить этого точнее. Еще столько же энергии люди истратили всего только за 40 лет — с 1900 по 1940 г. Но вот с 1940 г. по наши дни человечество вынуждено было потратить уже свыше 15 т энергии; всего только за три десятка лет израсходовано больше, чем за всю предшествующую историю мира.

А как быть людям дальше? Тут есть над чем подумать и над чем поработать.

Пожалуй, можно сказать, что расход невелик. Считая по массе, истрачено немного. Для перевозки такого груза хватило бы одного железнодорожного вагона.

Посчитайте-ка сами, сколько киловатт-часов понадобилось человечеству за всю его историю на все его нужды!

представлять форму, зеркально симметричную естественной кислоте.

Что же обнаружилось? По мере того как микробы размножались, в искусственной кислоте направление поляризации проходящего света все более и более поворачивалось. Если естественная кислота поворачивала плоскость поляризации направо, то синтезированная кислота после размножения микробов стала поворачивать плоскость поляризации налево.

Можно представить себе волнение и радость Пастера, когда его догадка подтвердилась. Эти опыты — единственный пример в истории физики, когда открытие было сделано с помощью микробов.

Таким образом, Пастер блестяще доказал свою гипотезу и, кроме того, показал, что уже низшие организмы могут отличить молекулу от ее зеркального подобия. Тот факт, что при любом способе искусственного получения вещества обе зеркальные формы появляются в одинаковом количестве, лишний раз подтверждает симметрию законов природы относительно зеркального отражения.

Предпочтение одной из двух зеркальных форм в живой природе следует объяснять не нарушением зеркальной симметрии законов природы, а историческими причинами.

В той части Земли, где впервые возникла жизнь, случайно оказалось больше, скажем, «правого строительного материала», чем «левого», и поэтому возникла одна из зеркальных форм, которая затем наследовалась.

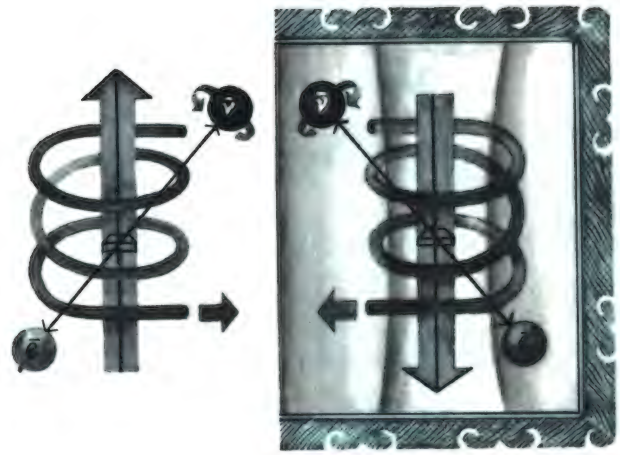
Что же касается различия в распространенности «правых» и «левых» минералов, то это различие можно объяснить тем, что во время их образования в окружающем веществе были сильные скручивающие напряжения или, если это была жидкость, сильные вихревые движения.

Физики пришли к глубокому убеждению, что все законы природы в нашем мире и в мире, зеркально отраженном, будут одинаковы.

Всегда ли наблюдается зеркальная симметрия?

В 50-х годах нашего века начались первые неувязки с этим законом. Частица (K^0-мезон) может распадаться либо на две, либо на три другие частицы (π-мезоны). Анализ опытов привел физиков к заключению, что здесь нарушается зеркальная симметрия. Закон зеркальной симметрии запрещает K^0-мезону распадаться обоими способами.

Опыт Ц. Ву. Электроны вылетают преимущественно под тупыми углами к магнитному полю. При зеркальном отражении острые углы заменяются на тупые, что означает нарушение зеркальной симметрии в β-распаде.



Но самый решительный удар был нанесен по закону зеркальной симметрии блестящим опытом американской исследовательницы Ц. Ву. Она наблюдала радиоактивный распад ядер, помещенных в магнитное поле. Из ядер вылетают электроны и антинейтрино или позитроны и нейтрино. Позитрон отли-

Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765)

Гениальный русский ученый-энциклопедист, академик Петербургской академии наук, член Шведской и Болонской академий. Своими великими открытиями Ломоносов обогатил почти все области знания, многие его идеи более чем на сто лет опередили науку того времени. Ломоносов впервые разграничил понятия «корпускула» (молекула) и «элемент» (атом), что нашло всеобщее признание лишь в середине XIX в. В противоположность представлениям о теплороде впервые развил основы кинетической теории материи. Он первый доказал закон сохранения вещества при химических реакциях, дал правильное объяснение таким явлениям, как молния, северное сияние, впервые установил, что планета Венера окружена атмосферой (1761). Большое место в работах Ломоносова занимала оптика, главным образом практическая сторона ее — конструирование и изготовление различных оптических приборов и инструментов. Очень важны для технического прогресса России работы Ломоносова по геологии, горному делу, металлургии, а также географии. Ломоносов — выдающийся поборник отечественного просвещения — явился преобразователем русского литературного языка, много сделал для развития русского искусства. По его инициативе в 1755 г. был основан Московский университет.

чается от электрона только знаком заряда. Нейтрино и антинейтрино — нейтральные частицы с массой, равной нулю. Обнаружилось, что электроны вылетают преимущественно под тупыми углами к направлению магнитного поля. Посмотрим на отражение этой установки в зеркале. Магнитное поле изменит свое направление на обратное, как винт, который из правого при отражении превращается в левый. Ведь направление магнитного поля определяется по направлению тока в катушке, создающей поле как раз по правилу винта. Поэтому острые углы к направлению магнитного поля в зеркале превратятся в тупые. Для того чтобы опыт и его зеркальное отражение были неотличимы, необходимо, чтобы острые и тупые углы встречались одинаково часто. Следовательно, результат опыта By прямо противоречит закону зеркальной симметрии. Наступил период смятения. Казалось, что следует отказаться и от других свойств симметрии нашего пространства.

Выход из тупика нашли советский физик Л. Д. Ландау и американские физики Ц. Ли и Ч. Янг. Идея была следующая: антинейтрино, вылетающее при радиоактивном распаде одновременно с электроном, представляет собой зеркально несимметричную частицу (она летит, вращаясь по часовой стрелке). Теперь при отражении в зеркале вся картина изменится — не только острые углы перейдут в тупые, но и антинейтрино из правого винта превратится в левый. Поскольку в зеркальной картине испускается частица, отличающаяся от антинейтрино, опыт By уже не противоречит зеркальной симметрии пространства.

Итак, зеркальная симметрия пространства сохраняется, асимметрия переносится на испускаемую частицу.

Если одновременно с отражением мысленно заменить все заряды на противоположные, то все электроны заменяются на позитроны, а нейтрино на антинейтрино и наоборот, и симметрия полностью восстановится.

Лев Давидович Ландау (1908—1968)

Советский физик, академик, лауреат Государственной (1946), Ленинской (1962) и Нобелевской (1962) премий. Работы Ландау посвящены теории твердого тела, физике низких температур, ядерной физике, космическим лучам. В 1940—1941 гг. разработал теорию явления сверхтекучести гелия. Ряд его работ посвящен сверхпроводимости. Ландау предложил теорию комбинированной инверсии и теорию двухкомпонентного нейтрино.

Антивещество

До этих опытов физики считали, что законы природы не изменятся, если все заряды заменить на противоположные. Это свойство законов природы называется зарядовой симметрией. Теперь, для того чтобы включить в рассмотрение и явление радиоактивного распада, этот закон пришлось уточнить. Природа обладает не зарядовой, а зарядово-зеркальной симметрией. Никакие законы природы не изменятся, если все заряды в мире изменить на обратные и одновременно произвести зеркальное отражение. В таком зарядово-зеркальном мире протоны будут иметь отрицательный заряд, а электроны — положительный в противоположность зарядам в нашем мире.

Законы физики допускают, наряду с частицами, существование античастиц. И такие античастицы действительно были обнаружены. Антиэлектрон, т. е. позитрон, был обнаружен еще в 1932 г. американским физиком Карлом Андерсоном. Позднее были обнаружены антипротон и антинейтрон. Поскольку ядро любого химического элемента состоит

Если встречный космонавт протянет вам левую руку, будьте осторожны,— возможно, он состоит из антивещества!

из протонов и нейтронов, то из антипротонов и антинейтронов можно составить антиядра. Если к такому ядру, заряженному отрицательно, добавить позитроны, то получится антиатом, а из антиатомов можно построить антивещество. Поскольку силы между античастицами по закону зарядовой симметрии равны силам между частицами, то антивещество будет обладать теми же химическими и физическими свойствами, что и вещество.

Приготовить антивещество в земных условиях очень трудно прежде всего потому, что частица, соединяясь с античастицей, уничтожается с выделением энергии в форме γ-квантов или других частиц. Удержать антивещество в коробке из вещества невозможно. Его можно было бы подвешивать в электромагнитном поле так, чтобы оно нигде не соприкасалось с веществом. Если бы нам удалось добыть антивещество искусственно, мы получили бы источник энергии в тысячу раз более сильный, чем термоядерная энергия, и в миллиард раз более сильный, чем энергия химических превращений.

Существуют ли в нашей Вселенной антимиры, т. е. области антивещества? Этот вопрос пока остается без ответа.

Из сказанного ясно, что антимир отличается от нашего мира не только знаком зарядов. В таком мире изменится и понятие правого и левого: антимир — зеркальное отражение нашего мира. Люди этого мира, если бы они проходили ту же историческую эволюцию, что и мы, имели бы сердце с правой стороны. Более сильной рукой у них была бы левая. Замечательный американский физик Ричард Фейнман в своих лекциях шутя говорил: «Если в космическом пространстве вы встретите корабль, идущий из далекого мира и космонавт протянет вам левую руку, берегитесь,— возможно, он состоит из антивещества!»

Физики, как уже говорилось, пришли к заключению, что пространство зеркально симметрично, так как законы природы не изменяются при зарядово-зеркальном отражении. А наблюдающееся при радиоактивном распаде нарушение зеркальной симметрии связано с тем, что вылетающая при этом частица (нейтрино или антинейтрино) не имеет зеркальной симметрии. Существование в нашем мире таких несимметричных частиц нисколько не противоречит симметрии пространства, так же как не противоречит этому тот факт, что у людей сердце с левой стороны.

Однако в последние годы были проделаны опыты по сравнению распада K^0-мезона и антиK^0-мезона. Было установлено, что антиK^0-мезон распадается не так, как должна была бы распадаться частица, зеркально подобная K^0-мезону. Это означает, что закон зарядово-зеркальной симметрии соблюдается не строго. Нарушение этого закона очень слабое и пока обнаружено только при распаде K^0-мезона. Но даже этот один пример подрывает наше убеждение в зеркальной симметрии пространства.

Рождение, жизнь и смерть химических элементов

О радиоактивности написаны десятки тысяч статей и сотни книг. Открытие этого явления — одно из величайших в истории науки.

Алхимики пытались осуществить превращение элементов, из обычного свинца получить благородное золото. Время развеяло в прах их наивные верования. В XIX столетии только безнадежные упрямцы еще думали, что из одного элемента можно получить другой. В науке считалось неоспоримым, что атом неделим.

А между тем в мире химических элементов течет своя, очень своеобразная и далеко не совсем понятная жизнь. Во Вселенной умирают одни атомы, другие рождаются. Происходит великий круговорот элементов.

Урановые лучи

В ноябре 1895 г. немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген открыл загадочные лучи, которые теперь весь мир называет *рентгеновскими* или Х-лучами (рис. 1). Исследователи пытались определить, как и почему эти лучи испускаются. И в частности, они полагали, что рентгеновским излучением может сопровождаться фосфоресценция — холодное свечение некоторых веществ. Подвергнутые действию солнечного света, такие вещества сохраняют затем определенное время способность самопроизвольно светиться. Быть может, фосфоресцирующие вещества сами служат источниками рентгеновского излучения? Это и решил проверить французский ученый Анри Беккерель.

Среди фосфоресцирующих веществ высокой активностью отличалась двойная сернокислая соль урана и калия — своеобразные урановые квасцы. Если фосфоресценция действительно сопровождается рентгеновским излучением, то образцы соли должны оставить отпечатки на фотопластинке, завернутой в черную бумагу. Ведь проникающая способность Х-лучей хорошо известна. Так рассуждал Беккерель. И его идея вскоре подтвердилась. Он мог заявить на конференции Парижской академии наук, что фосфоресцирующие вещества действительно испускают рентгеновские лучи.

Но, как серьезный ученый, он продолжал свои исследования. Однажды (это было в конце февраля 1896 г.) он все подготовил для опыта, но солнце в тот день так и не появилось на парижском небе, и его лучи не могли вызвать фосфоресценцию урановой соли.

Оставалось дожидаться ясной погоды. Через несколько дней Беккерель, щурясь от весеннего солнца, распахнул окно своей лаборатории. Но прежде чем выставлять на свет новую пластинку, он решил проявить старую, ту самую, которая пролежала несколько дней в ящике стола, завернутая в черную бумагу, под образцами урановой соли. На негативе обнаружились темные пятна, в точности соответствовавшие форме и положению образцов урановой соли.

Мария Склодовская-Кюри и Пьер Кюри в лаборатории. Париж.

А ведь эти образцы предварительно не освещались, как в предыдущих опытах ученого.

Так, 1 марта 1896 г. было открыто новое явление. Урановая соль испускала лучи неизвестного типа. Они во многом были похожи на рентгеновские: проходили через плотную бумагу, дерево, тонкие металлические пластинки. Они делали воздух проводником электричества, так же как и лучи Рентгена. Но все-таки это были не рентгеновские лучи. Рентгеновские лучи могли отражаться и преломляться; лучи Беккереля этим свойством не обладали. Поставив много опытов, Беккерель доказал, что источник его лучей — элемент уран. И назвал лучи урановыми.

Элемент уран оказался не единственным, способным испускать новые лучи. Соотечественники Беккереля — Пьер и Мария Кюри из десятков тонн руды выделили миллиграммы неизвестных ранее элементов — полония и радия. Эти элементы также испускали урановые лучи. Аналогичные свойства исследователи обнаружили у тория.

Лучи, открытые Беккерелем, стали называть *радиоактивными* (от латинского слова «радиус» —

Рис. 1.

луч), а само явление их испускания — *радиоактивностью.*

Четыре важных вывода сделали ученые в самом начале XX в. Они доказали, что радиоактивность — свойство атома. Было установлено, что радиоактивные элементы уран, радий, полоний, актиний, торий встречаются в земных минералах все вместе. Оказалось, что радиоактивность — явление постоянное и не ослабевает со временем. И наконец, ученые выяснили, что радиоактивное излучение неоднородно и состоит из нескольких сортов лучей.

Полшага до открытия

Радиоактивность могла быть открыта раньше. Но ее значение ученые не поняли бы. Так, собственно, и случилось за 30 лет до работы Беккереля.

В 1868 г. Парижская академия наук предоставила свою трибуну Ниепсу де Сен-Виктору. Скромный естествоиспытатель, занимавшийся изучением фотографических процессов, отнюдь не жаждал славы. Он без всяких претензий доложил высокому собранию свою работу «О новых действиях света». В ней он рассказывал, как различные виды света действуют на фотографическую пластинку.

Ниепс де Сен-Виктор проделал много опытов, в том числе и с фосфоресцирующими веществами. И среди этих веществ была двойная сернокислая соль урана и калия. Ее призрачное бледно-зеленое свечение заставляло темнеть пластинку, даже если пластинка была обернута в черную бумагу.

Ученые довольно равнодушно выслушали рассуждения Ниепса о некоем новом сорте световых лучей, которые проходят сквозь плотную бумагу. Сообщение исследователя было напечатано, пожалуй, лишь из соображений этики. Напечатано — и забыто!

Точно так же прошли незамеченными аналогичные опыты Арнодона, безвестного химика из Лиона.

А ведь этим неудачникам оставалось сделать полшага до открытия радиоактивности. Эпоха «лучевой лихорадки» еще не наступила. Она началась лишь после того, как Рентген обнаружил Х-лучи. Открывать новые лучи стало своеобразной модой.

Три вида лучей

Природа рентгеновских лучей проста: это электромагнитные колебания с малой длиной волны. Иное дело природа радиоактивных излучений. Когда их подвергли действию электрического поля, они разделились на два потока, отклонявшихся в разные стороны. Это означало, что у одной части лучей положительный электрический заряд, а у другой — отрицательный. Затем лучи поместили в магнитное поле. И снова ученые обнаружили их неоднородность.

Стало быть, радиоактивное излучение представляло собой поток частиц, притом с разными значениями массы: одни — с большим, другие — с меньшим. На страницах научных журналов появились новые термины: α-излучение и β-излучение; α-частицы и β-частицы.

Скоро был обнаружен третий компонент радиоактивного излучения. На сей раз настоящие лучи. Они были подобны рентгеновским, только их проникающая способность оказалась значительно выше. Их назвали γ-лучами (рис. 2).

Итак, при радиоактивном распаде атома из него выбрасываются две материальные частицы разной массы (альфа и бета) и испускаются лучи (гамма). Правда, одним элементам свойственно только α-излучение; другим — только β-излучение. Радий представлял собой классический α-излучатель, а его правый сосед по таблице Менделеева — актиний испускал только β-частицы.

Рис. 4. Радиоактивное семейство урана-238.

Рис. 5. Радиоактивное семейство урана-235.

Рис. 2.

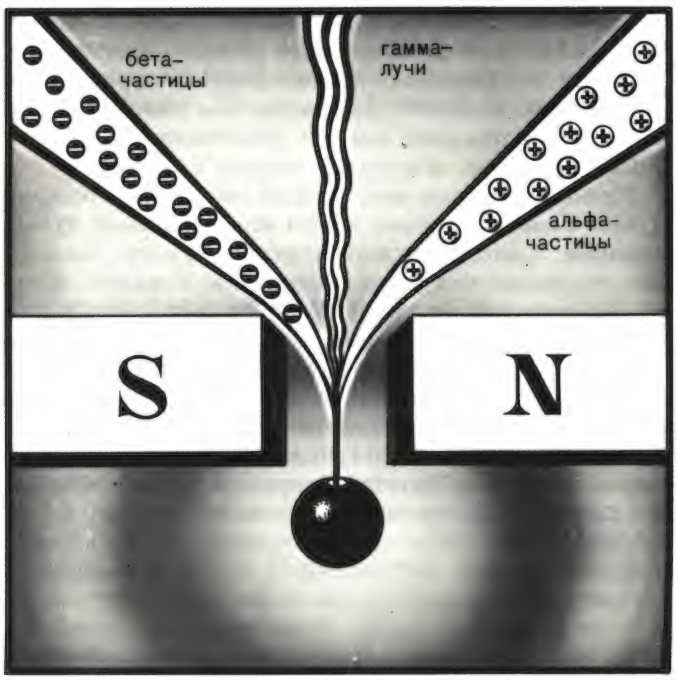


Рис. 3. Явление изотопии свойственно не только радиоактивным, но и всем прочим элементам таблицы Менделеева. На рисунке показано, как построены три изотопа первого элемента — водорода: протий, дейтерий (они стабильны) и тритий (он радиоактивен с периодом полураспада около 12 лет)

Металл = газ + газ

Такое не могло присниться даже самым фанатичным алхимикам. Маленькая крупинка серебристого металла радия, несравненно более редкого и дорогого, чем золото, таяла. Со временем она могла совершенно исчезнуть. Материя как бы обращалась в ничто. Но ведь материя не может пропадать бесследно. Значит, радий в ходе своего радиоактивного распада превращается в какое-то другое вещество.

Ученые раскрыли тайну α-частицы. Они измерили ее электрический заряд. Он оказался равным двум, если за единицу заряда считать заряд электрона. Два положительных электрических заряда уносила с собой α-частица. Ученые рассчитали ее массу; оказалось, что масса α-частицы в четыре раза больше массы атома водорода. А раз так, то α-частица не может быть чем-либо иным, как атомом ближайшего к водороду элемента гелия, у которого недостает двух электронов, и потому его положительный заряд равен 2. Итак, из радия испускается гелий. Во что же превращается сам радий?

Наука о превращениях химических элементов имеет свою символику, которая позволяет записывать уравнения ядерных реакций. Слева вверху от символа элемента пишется его атомная масса, слева внизу — порядковый номер (заряд ядра). Например, $^{226}_{88}Ra$. Так можно изобразить изотоп любого элемента. В данном случае индекс «226» — это массовое число одного из изотопов радия. На языке ядерной физики α-частица может быть записана как $^{4}_{2}He$. Итак, $^{226}_{88}Ra - {}^{4}_{2}He = ?$

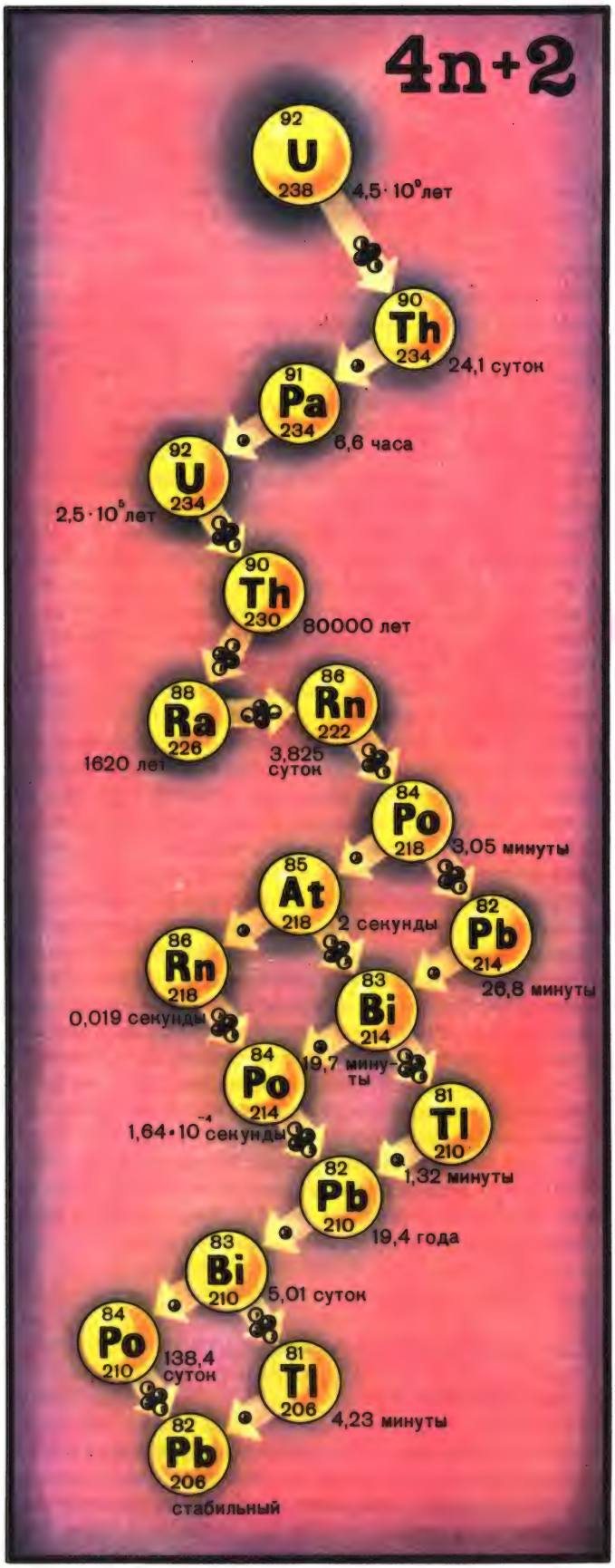
Атом радия теряет два заряда (88 — 2 = 86) и уменьшает свою массу на 4 единицы (226 — 4 = 222). Следовательно, радий превращается в какой-то элемент с зарядом 86 и атомной массой 222, т. е. $^{222}_{86}X$.

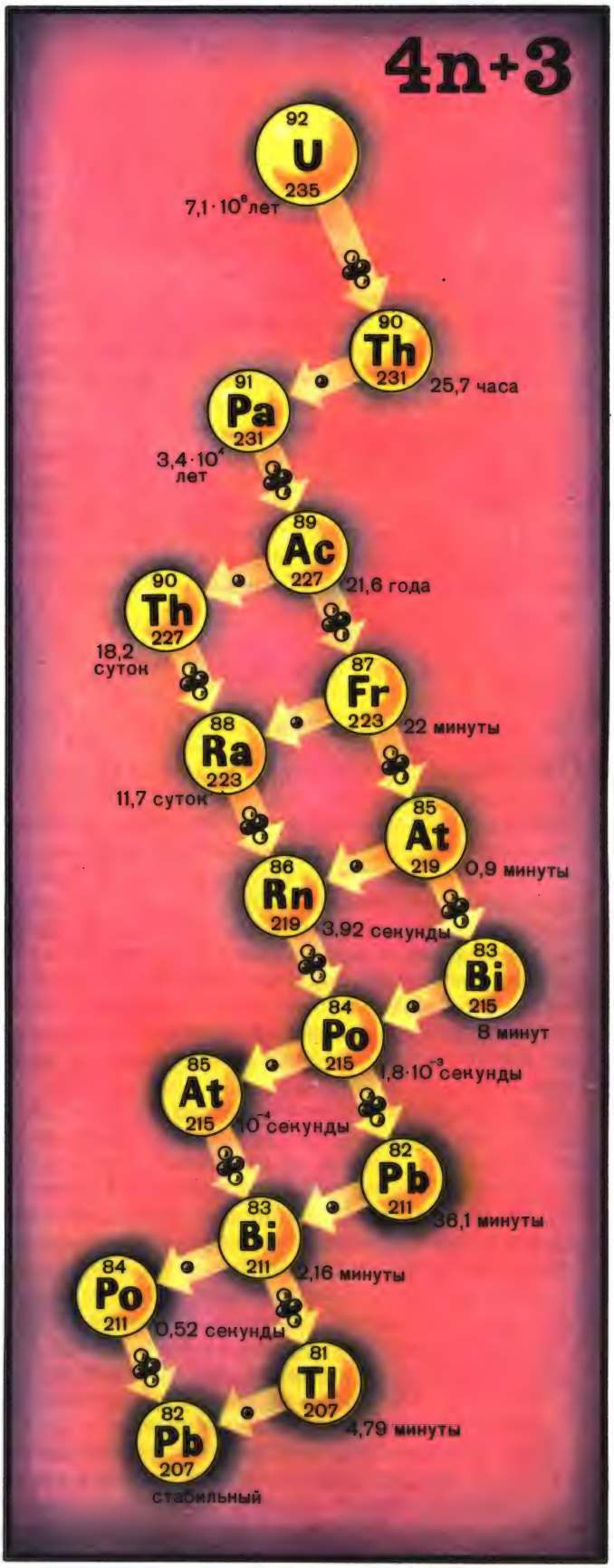
В 1900 г. английский ученый Эрнест Резерфорд впервые доказал образование нового элемента при радиоактивном распаде радия. Он назвал его радоном. В периодической системе элементов радон (Rn) занял место в группе инертных газов.

Следовательно, ядерную реакцию радиоактивного распада радия можно записать так:

$$^{226}_{88}Ra - {}^{4}_{2}He = {}^{222}_{86}Rn.$$

Природа β-частицы оказалась проще. Ученые признали ее полное сходство с электроном — частицей, несущей отрицательный электрический заряд. Актиний, испуская β-частицу, превращается в торий. При этом он сохраняет ту же массу (так как масса


4n+2
92 U 238
4,5 · 10⁹ лет
90 Th 234
24,1 суток
91 Pa 234
6,6 часа
92 U 234
2,5 · 10⁵ лет
90 Th 230
80000 лет
88 Ra 226
1620 лет
86 Rn 222
3,825 суток
84 Po 218
3,05 минуты
85 At 218
2 секунды
82 Pb 214
26,8 минуты
86 Rn 218
0,019 секунды
83 Bi 214
19,7 минуты
84 Po 214
1,64 · 10⁻⁴ секунды
81 Tl 210
1,32 минуты
82 Pb 210
19,4 года
83 Bi 210
5,01 суток
84 Po 210
138,4 суток
81 Tl 206
4,23 минуты
82 Pb 206
стабильный


4n+3
92 U 235
7,1 · 10⁸ лет
90 Th 231
25,7 часа
91 Pa 231
3,4 · 10⁴ лет
89 Ac 227
21,6 года
90 Th 227
18,2 суток
87 Fr 223
22 минуты
88 Ra 223
11,7 суток
85 At 219
0,9 минуты
86 Rn 219
3,92 секунды
83 Bi 215
8 минут
84 Po 215
1,8 · 10⁻³ секунды
85 At 215
10⁻⁴ секунды
82 Pb 211
36,1 минуты
83 Bi 211
2,16 минуты
84 Po 211
0,52 секунды
81 Tl 207
4,79 минуты
82 Pb 207
стабильный

электрона очень мала), но заряд атома увеличивается на 1:

$$^{227}_{89}\mathrm{Ac} - \bar{e} = {}^{227}_{90}\mathrm{Th}.$$

Такую схему радиоактивного распада предложили Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди.

Радон и торий, получающиеся в рассмотренных нами реакциях распада, не остаются неизменными. Они, в свою очередь, распадаются. Радон-222 испускает α-частицу и превращается в полоний-218. Торий-227 также выбрасывает α-частицу и становится радием-223. Цепочки радиоактивных распадов оказались сложными и запутанными. Ученым предстояло разобраться в них. Ясно было одно: радиоактивный распад представляет собой процесс превращения элементов, происходящий независимо от воли человека.

Упорядоченный хаос

Радий, распадаясь, рождает «эманацию» — радон («эманация» по-латыни — истечение). Ученые изучили продукты радиоактивного превращения тория и среди них нашли газ, который ничем не отличается от радона. Актиний тоже выделяет «эманацию», и она как две капли воды похожа на радон. Все эти три вида «эманации» различаются только массой их атомов и, добавим, своими радиоактивными характеристиками. Уже не один, а целых три инертных газа претендовали на 86-ю клетку таблицы Менделеева.

За короткий срок ученые открыли более 30 самостоятельных радиоактивных веществ. Каждое из них предлагали считать за отдельный элемент. Однако таблица Менделеева располагала лишь восемью свободными клетками. Например, три радиоактивных вещества (их назвали уран-икс, ионий и радиоторий) химически были совершенно неразличимы и не имели никаких отличительных черт по сравнению с обычным торием. На клетку 90 периодической системы обрушилась неожиданная беда. Четыре элемента-близнеца предъявили на нее одинаковые права. Пришлось отказаться от старых представлений, что все атомы данного элемента однородны.

«Они неоднородны! — заявил Фредерик Содди в 1913 г.— У каждого радиоактивного элемента может быть несколько сортов атомов. У них одинаковый заряд, они обладают одними и теми же свойствами и отличаются друг от друга только величиной атомных весов». Такие разновидности атомов Содди назвал изотопами (рис. 3). Это был первый шаг к упорядочению хаоса в представлениях о мире радиоактивных элементов. Все три «эманации» могли спокойно располагаться теперь в клетке 86 периодической системы, нисколько не нарушая ее основы. Так же разместились и изотопы других радиоактивных элементов.

Уже в первые годы изучения радиоактивности исследователи пытались выяснить, подчиняются ли разнообразные цепочки радиоактивных превращений какой-то системе, или же они безнадежно запутаны. И здесь понятие об изотопах внесло ясность. Оказалось, что разные цепочки отдельных радиоактивных распадов могут быть сплетены в длинные цепи, у которых есть вполне определенное начало и столь же определенный конец. И все изотопы радиоактивных элементов — звенья той или иной цепи. Эти цепи называют теперь радиоактивными семействами или рядами радиоактивных превращений, а иногда — радиоактивным древом.

Корни, из которых произрастают эти «древа», т. е. родоначальники радиоактивных семейств,— это изотопы урана и тория: торий-232, уран-235, уран-238. В конце длинных цепочек альфа- и бета-превращений находятся устойчивые (стабильные) изотопы свинца (рис. 4, 5, 6).

Массовые числа всех изотопов, входящих в семейство тория, делятся без остатка на 4. Поэтому ториевое семейство иногда обозначают как $4n$-семейство. Аналогичным образом семейства урана-238 и урана-235 будут $(4n + 2)$- и $(4n + 3)$-семействами, так как при делении массовых чисел их изотопов на 4 соответственно получается в остатке 2 и 3.

Таков был второй шаг, превративший хаос в представлениях о радиоактивных элементах в строгий порядок. Но радиоактивность продолжала загадывать ученым трудные загадки. Ну, скажем, почему не удавалось обнаружить в природе ни одного изотопа, который входил бы в $(4n + 1)$-семейство? Куда делось это четвертое радиоактивное «древо»?

Элементы первичные и вторичные

Давайте немного пофантазируем. Представим себе нашу планету через... сто миллиардов лет. Конечно, никто не в силах предвидеть, что случится с Землей за этот громадный срок. Но допустим, что ничего из ряда вон выходящего не случится. Можно в таком

случае уверенно сказать, какой элемент из существующих в природе будет на Земле замыкать таблицу Менделеева?

Уран? Нет! Самым тяжелым элементом периодической системы окажется висмут с порядковым номером 83. А все радиоактивные элементы бесследно исчезнут, потому что у радиоактивных элементов и всех их изотопов вполне определенная продолжительность жизни.

Чтобы охарактеризовать долговечность того или иного радиоактивного изотопа, ученые ввели понятие *период полураспада*. Это то время, за которое распадается половина любой массы радиоактивного изотопа. Величины периодов полураспада могут быть самыми различными.

Известны изотопы, которые теряют половину своих атомов за миллиардную долю секунды. Известно и потрясающее «долголетие», когда продолжительность жизни изотопа измеряется триллионами, или миллиардами миллиардов, лет.

Сравнивая периоды полураспада у изотопов, входящих в радиоактивные семейства, можно сделать любопытное наблюдение: «отцы» семейств отличаются от своих «детей» поразительным долголетием.

У тория-232 период полураспада 14 млрд. лет; у урана-238 — примерно в три раза меньше. А уран-235 распадается значительно активнее — за 700 млн. лет он растрачивает половину своих атомов. По сравнению с этими громадными числами периоды полураспада у других изотопов, входящих в семейства, очень малы: секунды, минуты, сутки, годы, в лучшем случае десятки тысяч лет. Например, самый долгоживущий изотоп радия распадается наполовину всего за 1620 лет.

Наша планета существует, как считают ученые, более 3 млрд. лет. Если бы радиоактивные элементы: полоний, астат, радон, франций, радий, актиний, протактиний — все, кроме урана и тория, были бы, так сказать, предоставлены самим себе, у них не было бы никаких шансов уцелеть за этот громадный срок. И ученые терялись бы в догадках, куда девались семь элементов конца периодической системы.

Время еще пощадило торий и уран, но и их количество заметно уменьшилось с момента образования земного шара.

Если мы до сих пор находим в земных минералах короткоживущие радиоактивные элементы, значит, они непрерывно образуются вновь. И источником их оказываются «отцы» радиоактивных семейств — уран и торий. Погибая сами, их атомы дают жизнь атомам других радиоактивных элементов. И этот источник иссякнет лишь, когда исчезнут на Земле торий и уран. А произойдет это примерно через несколько десятков миллиардов лет.

Уран и торий называют *элементами первичными*. Они своеобразные «генераторы» *вторичных* радиоактивных элементов (протактиния, радия, технеция, прометия и др.).

Четвертое «древо» радиоактивных превращений — $(4n + 1)$ -семейство — оказалось вымершим. Ученые искусственным путем приготовили все изотопы, которые должны были входить в него. И у всех у них периоды полураспада очень малы. Родоначальником семейства является изотоп нептуний-237 (рис. 7).

Что такое радиоактивность?

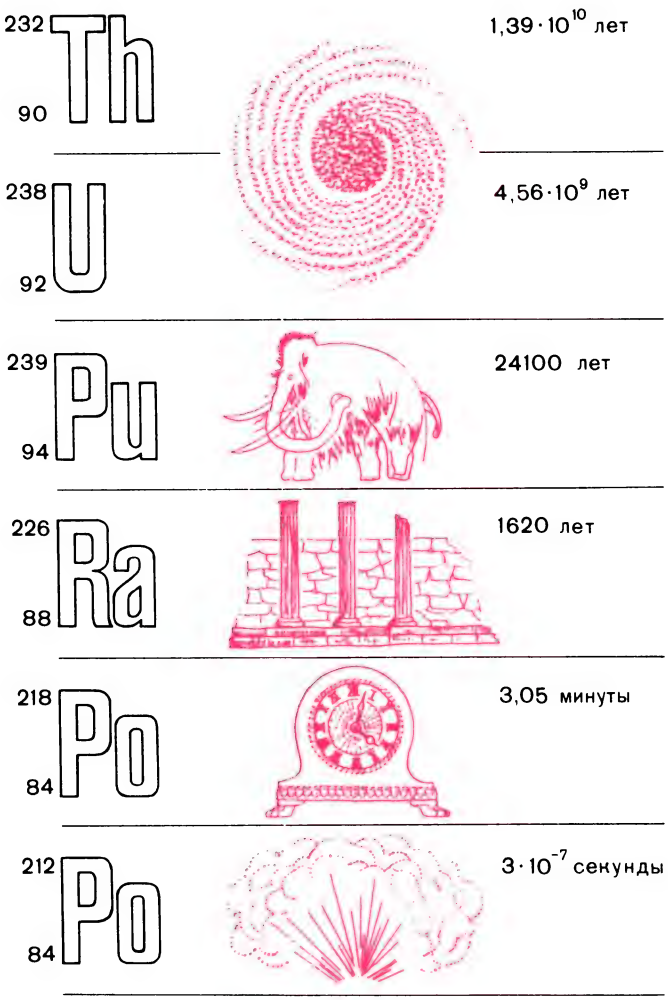
Радиоактивность — самопроизвольный распад атомов некоторых химических элементов, расположенных в конце таблицы Менделеева. Так отвечали ученые в начале XX в. Но их ответ рождал новый вопрос: а почему этот самопроизвольный распад происходит? Почему атомы у одних химических элементов устойчивы, а у других — нет?

Одни исследователи полагали, что радиоактивный распад вызывается излучением, проникающим на Землю из мирового пространства,— чем-то вроде открытых в то время космических лучей. Атомы тяжелых элементов обладают способностью накапливать эту энергию. Они возбуждаются, и возбуждение становится причиной их радиоактивного распада. Но эта гипотеза не подтверждалась. Эксперименты убеждали, что никакие внешние условия не влияют на радиоактивный распад — не ускоряют и не замедляют его.

В 1906 г. ученым удалось сделать сенсационное открытие. Элементы калий и рубидий, расположенные очень далеко от «неустойчивого» конца таблицы Менделеева, обнаружили слабую β-активность. Правда, периоды полураспада их радиоактивных изотопов равны тысячам миллиардов лет. Но важен сам факт: «тяжесть» атомов, видимо, ни при чем и радиоактивность не привилегия элементов, завершающих периодическую систему.

Тогда у ученых появилась догадка. Быть может, радиоактивность — это общее свойство всех атомов: все они в итоге обречены на взаимное превращение. И только то, что большинство изотопов обладает огромными периодами полураспада, не дает нам заметить их радиоактивность.

Несколько примеров различной «долговечности» изотопов.



Эту гипотезу пока нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть, но время работает на нее. Число природных радиоактивных изотопов тех элементов, для которых радиоактивность раньше трудно было и предположить, непрерывно растет.

Естественная радиоактивность теперь обнаружена (или предполагается) у отдельных изотопов пятидесяти с лишним элементов, не относящихся к радиоактивным семействам. Все они отличаются долговечностью.

Другие исследователи видели причину радиоактивности в неустойчивости самих атомов, в том, что из-за каких-то загадочных причин, связанных со строением атомов, некоторые атомы оказываются не способными к постоянному существованию. Словно что-то разрывает их изнутри. Такое объяснение ничем не могло помочь науке. Ведь ученые в то время толком не знали даже, как устроен атом. Атом считали положительно заряженной материальной сферой, в которой инкрустированы точечные электроны. Суммарный отрицательный заряд электронов нейтрализован положительным зарядом сферы. И это все, что было известно об атоме.

Рис. 6. Радиоактивное семейство тория-232.

Рис. 7. Радиоактивное семейство нептуния-237.

«Я вижу атом!»

Тех, кто бывал в лаборатории Резерфорда, всегда поражала простота ее оборудования. Никаких сложных приборов! Иные аппараты казались даже примитивными. Но с их помощью знаменитый ученый и его сотрудники отвоевывали у природы больше тайн, чем иные институты, насыщенные сложной и дорогостоящей техникой.

С помощью нехитрого сооружения Резерфорд доказал существование атомного ядра. Это произошло во время опытов, целью которых было определить, как рассеиваются α-частицы на металлах. Прибор отмечал поведение таких частиц, проходящих через тончайшую золотую пластинку. Выяснилось, что частицы ведут себя по-разному. Одни проходят через пластинку, не меняя направления. Другие слегка отклоняются в сторону. А третьи почему-то отлетают обратно к источнику, словно наталкиваются на неожиданный встречный удар.

Резерфорд был поражен результатами эксперимента и говорил впоследствии о нем как о самом невероятном событии в его жизни: «Это было почти столь же невероятно, как если бы вы выстрелили пятнадцатидюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд вернулся бы и нанес вам удар».

Но этот «снаряд» в клочья разнес прежние представления о строении атома: α-частица могла отлететь строго назад, только столкнувшись с мощным положительным зарядом, да еще если тот был бы сконцентрирован в малом объеме (рис. 8). А по старым представлениям, атом — это расплывчатая сфера больших размеров, на поверхности которой положительный заряд словно размазан тонким слоем.

Резерфорд сделал из этого опыта вывод: у атома есть ядро, в котором сгустилась почти вся масса атома, и именно в ядре сосредоточен весь положительный заряд. Диаметр ядра оказался в 100 000 раз меньше, чем диаметр атома. Атом, который раньше принимали за нечто непроницаемое, по сути дела оказался прозрачным!

Так родилась *резерфордовская модель атома*. Она представляла его строение подобным Солнечной си-

4n
90 Th 232
1,39 · 10^10 лет
88 Ra 228
6,7 года
89 Ac 228
6,13 часа
90 Th 228
1,90 года
88 Ra 224
3,64 суток
86 Rn 220
51,4 секунды
84 Po 216
0,158 секунды
85 At 216
3 · 10^-4 секунды
82 Pb 212
10,6 часа
83 Bi 212
60,5 минуты
84 Po 212
3 · 10^-7 секунды
81 Tl 208
3,1 минуты
82 Pb 208
стабильный
4n+1
93 Np 237
2,2 · 10^6 лет
91 Pa 233
27,4 суток
92 U 233
1,6 · 10^5 лет
90 Th 229
7340 лет
88 Ra 225
14,8 суток
89 Ac 225
10 суток
87 Fr 221
4,8 минуты
85 At 217
0,018 секунды
83 Bi 213
47 минут
84 Po 213
4,2 · 10^-6 секунды
81 Tl 209
2,2 минуты
82 Pb 209
3,3 часа
83 Bi 209
3 · 10^17 лет
81 Tl 205
стабильный

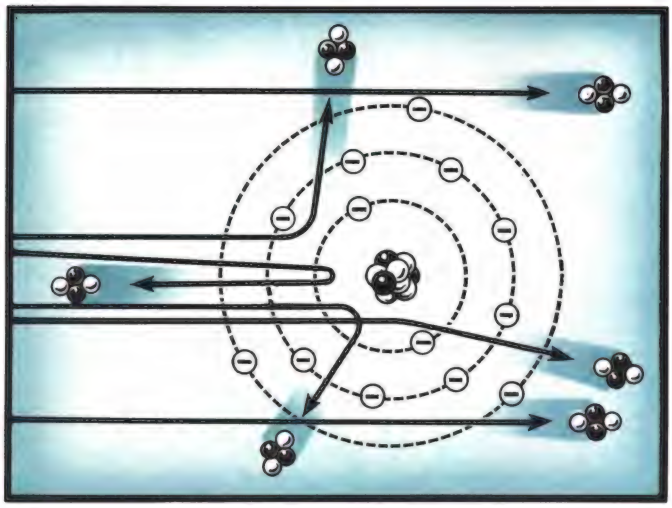


Рис. 8. Схема столкновения α-частиц с ядром.

стеме: в центре ядро — Солнце, вокруг по орбитам движутся электроны — планеты. Ядро, по представлениям Резерфорда, состоит из протонов — носителей элементарного положительного заряда — и электронов. Протонов в ядре столько, сколько электронов содержится в ядре атома и на его орбитах. Например, в ядре атома гелия содержится 4 протона и 2 электрона. Положительный заряд ядра гелия равен поэтому 2, и нейтрализуется он двумя электронами на электронной оболочке атома.

Но и эта модель не давала ответа на вопрос, в чем же причина радиоактивности.

Резерфорд мог бы сказать: «Я вижу атом!» Но чутьем гениального ученого он понимал, что атом нужно не только видеть, но и разглядеть во всех деталях. И особенно его ядро. Но у ученых не было средств, которые позволили бы им проникнуть в глубь ядра.

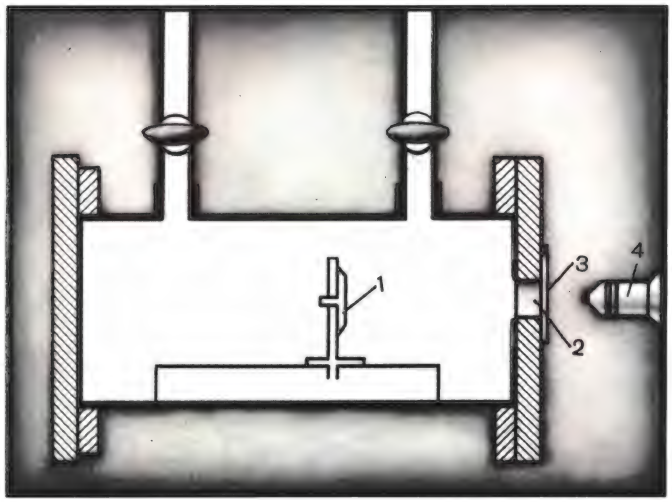


Рис. 10.

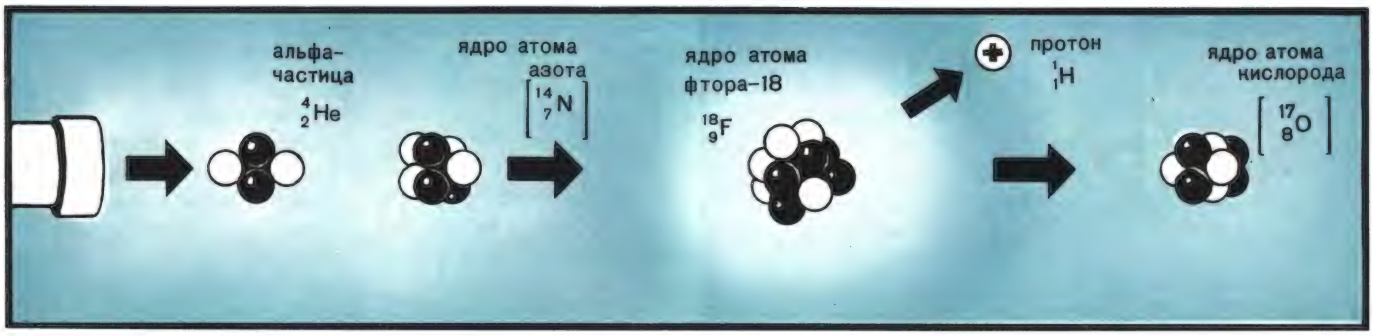
Рис. 9. Схема прибора, в котором Резерфорд наблюдал превращение атомных ядер: *1* — диск, на который был нанесен препарат, испускающий α-частицы; прибор заполнен азотом; *2* — отверстие в стенке прибора; *3* — экран, покрытый сернистым цинком; *4* — приспособление для наблюдения вспышек на экране. Диск находился на таком расстоянии от экрана, что α-частицы не могли его достигнуть. Но Резерфорд обнаружил на экране вспышки и сделал вывод, что их вызывают какие-то другие частицы. Ими оказались протоны, выбиваемые α-частицами из ядер азота.

Азот превращается в кислород

У ядер тяжелых элементов большой заряд. В опытах Резерфорда, которые привели к созданию ядерной модели, поток α-частиц встречал на своем пути ядра золота — элемента из конца периодической системы. И электростатические силы отталкивания между положительным зарядом α-частиц и ядрами атомов золота были очень велики.

А если взять легкие элементы? Скажем, азот. У его ядра небольшой заряд. Силы, отталкивающие α-частицу от такого ядра, были бы значительно меньше. Быть может, α-частице удалось бы проникнуть в ядро?

...В самом конце первой мировой войны Резерфорд однажды не явился на заседание Британского комитета борьбы с подводными лодками. Когда его упрекнули в невнимании к своим обязанностям, он в весь-



ма резкой форме ответил: «Я был занят экспериментами, из которых следует, что атом можно искусственно разделить. А такая перспектива значительно важнее, чем война!»

Великий ученый нисколько не преувеличивал. В июне 1919 г. он опубликовал результаты своих исследований. С тех пор начался в атомной науке новый этап — эпоха искусственного превращения элементов. В природных радиоактивных процессах элементы превращались друг в друга естественным образом. Человек оставался лишь свидетелем этого удивительного явления. Резерфорд дал человеку возможность управлять превращением элементов.

Резерфорд обстреливал азот α-частицами и в результате получил какие-то более легкие частицы (рис. 9). Он доказал, что эти частицы — ядра атомов водорода, протоны. Значит, протоны действительно входят в состав атомных ядер. Если протон покидает атомное ядро, то заряд ядра изменяется и рождается ядро нового элемента.

Массовое число у изотопа азота — 14, заряд ядра — 7. В ядро азота влетает α-частица с массой 4 и зарядом 2. Образуется сложная система: ее масса — 18, а заряд — 9. Вылетающий протон уносит одну единицу массы и одну единицу заряда. В итоге получается ядро с массой 17 и зарядом 8. Заряд ядра, равный 8, может быть только у кислорода. Следовательно, в опытах Резерфорда азот превратился в кислород (рис. 10). Это превращение можно записать символами ядерной физики:

$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$, или в сокращенном виде:

$^{14}_{7}\mathrm{N}\,(\alpha,\ p)\,{}^{17}_{8}\mathrm{O}$, где p — обозначение протона.

Резерфорду удалось расщепить и другие ядра — атомов бора, натрия, фтора, алюминия, фосфора и других элементов. Вот как, например, протекало превращение алюминия:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}, \text{ или } {}^{27}_{13}\mathrm{Al}\,(\alpha,\ p)\,{}^{30}_{14}\mathrm{Si}.$$

На примере этой ядерной реакции ученые впервые подсчитали, какая энергия выделяется при искусственном превращении элементов. И оказалось, что при превращении алюминия в кремний выделяется в 700 000 раз больше энергии, чем при химическом сгорании такой же массы углерода.

Но α-частица могла сокрушить лишь ядра легких элементов. Для того чтобы проникнуть в ядра элементов тяжелее калия, ей не хватало быстроты. Вот если бы α-частицу удалось каким-нибудь образом ускорить или найти другой «снаряд», для которого положительный заряд ядра не был бы помехой!

Эрнест Резерфорд (1871—1937)

Английский физик, член Лондонского королевского общества, член академий и научных обществ ряда стран, почетный член АН СССР, лауреат Нобелевской премии (1908). Своими фундаментальными открытиями Резерфорд заложил основы современного учения о радиоактивности и строении атома. В 1899 г. он обнаружил, что радиоактивное излучение состоит из двух частей, которые он назвал альфа- и бета-лучами. Совместно с Ф. Содди в 1903 г. создал теорию радиоактивного распада, которую подтвердил рядом блестящих опытов. В 1911 г. Резерфорд предложил планетарную модель атома на основе опытов по рассеянию альфа-лучей атомами различных элементов. В 1919 г. впервые расщепил ядро атома. С этого времени работы Резерфорда были посвящены вопросам искусственного превращения атомных ядер под действием быстродвижущихся частиц.

Нейтрон и новая модель атома

В распоряжении физиков того времени был протон — положительно заряженная частица и электрон — частица с таким же отрицательным зарядом. Ученые давно пытались установить, не существует ли частица с зарядом, равным нулю. Еще в 1902 г. английский физик В. Сезерленд робко предположил существование «нуль-частицы». Через 18 лет Резерфорд вполне определенно предсказал нейтрон, частицу без заряда, и предугадал ее свойства. Он представлял ее себе как тесно слипшиеся между собой

протон и электрон. Но в то время опыты не подтвердили идею Резерфорда. Существование нейтрона было доказано на опыте только в 1932 г.

За два года до этого события родился новый термин — «бериллиевые лучи». Они возникали, когда α-частицами бомбардировали бериллий. Бериллий при этом не превращался в другой элемент, но испускались какие-то лучи. Сначала думали, что это гамма-излучение. Но γ-лучи не могли обладать такой большой энергией и такой проникающей способностью. Значит, бериллиевые лучи нечто новое.

Их природу установил ученик Резерфорда Джемс Чэдвик. Он доказал, что бериллиевые лучи — это поток частиц с массой протона, не обладающих зарядом. Отсутствие заряда и было причиной их проникающей способности. Их назвали нейтронами.

В 1932 г. почти одновременно советский ученый Д. Д. Иваненко и немецкий ученый Вернер Гейзенберг предложили новую модель ядра. Электроны начисто изгонялись из его структуры. Их место заняли нейтроны. Число протонов в ядре принималось равным порядковому номеру данного элемента. Одному и тому же числу протонов могло соответствовать разное число нейтронов. Так очень просто объяснилось явление изотопии: изотопы какого-либо элемента отличались числом нейтронов в ядрах их атомов. Например, у изотопов азота с массовыми числами 14 и 15 число протонов постоянно (равно 7), а число нейтронов равно либо 7, либо 8. Но какие силы удерживают протоны и нейтроны в ядре, не дают ядру рассыпаться? Ведь в ядре между положительно заряженными протонами должны существовать гигантские силы отталкивания.

Это объяснил японский физик Хидэки Юкава. Он предположил, что протоны и нейтроны удерживаются в ядре с помощью особого «ядерного клея» — частиц с массой, примерно в 200 раз большей массы электрона. Позднее эти частицы назвали *мезонами*, и теперь наука знает несколько их видов. В ядрах протоны и нейтроны с чудовищной быстротой как бы обмениваются мезонами, и благодаря этому обменному взаимодействию между составными элементами ядра оно становится способным существовать.

Пьер Кюри (1859—1906)

Французский физик, член Парижской академии наук, лауреат Нобелевской премии (1903). Кюри провел классические исследования по изучению свойств кристаллов, магнетизму и радиоактивности. В 1880 г. совместно с братом Жаном Кюри открыл явление пьезоэлектричества. Изучал магнетизм (закон Кюри), для железа обнаружил существование особой температуры (точка Кюри), выше которой исчезают его ферромагнитные свойства. Совместно с женой М. Склодовской-Кюри открыл полоний и радий (1898) и изучал явление радиоактивности.

Цепь великих открытий

Много лет элемент уран был замыкающим в периодической системе. Сам Д. И. Менделеев советовал будущим поколениям исследователей скрупулезно изучать уран. Еще при жизни ученого в результате исследований урана было открыто явление радиоактивности и обнаружен в природе гелий.

В конце 30-х годов нашего столетия уран снова оправдал гениальное предвидение Менделеева. И главным действующим лицом здесь оказался нейтрон. Итальянский физик Энрико Ферми в 1934 г. стал обстреливать нейтронами один элемент периодической системы за другим. Он решил иным путем повторить интереснейшие эксперименты супругов Ирен и Фредерика Жолио-Кюри, которые годом раньше подарили миру замечательное открытие.

Почему у химических элементов число изотопов, встречающихся в природе, все же весьма ограниченно? Скажем, кислород имеет изотопы с массовы-

ми числами 16, 17 и 18. Но отчего нет кислорода-19 или кислорода-15? Вероятно, они просто не могут существовать. Может, потому, что попросту они неустойчивы? Ученые думали об этом, но подтвердить догадку им долго не удавалось.

Ее подтвердили своими экспериментами Фредерик и Ирен Жолио-Кюри. Они изучали, какие вещества под действием α-частиц способны испускать нейтроны. Такую способность им удалось наблюдать у алюминия. Но если алюминий действительно испускает нейтроны, то превращается он тогда не в кремний, как мы видели из уравнения ядерной реакции на стр. 285, а в другой элемент — фосфор:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n, \text{ или } {}^{27}_{13}\mathrm{Al}\,(\alpha, n)\,{}^{30}_{15}\mathrm{P},$$

где n — обозначение нейтрона.

Но изотоп фосфор-30 был новым изотопом элемента, не обнаруженным в природе. Ученые нашли, что изотоп этот радиоактивен и продукт его распада — кремний-30. Этот изотоп кремния мог образоваться только в том случае, если бы фосфор испустил какую-то частицу с массой электрона, но с положительным зарядом. Такую частицу открыл в 1932 г. американец Карл Андерсон. Она была названа *позитроном*.

Итак, был найден способ возбуждать искусственную радиоактивность, получать искусственные радиоактивные изотопы, не существующие в природе. Таких радиоактивных изотопов известно теперь более тысячи. Кроме того, супруги Жолио-Кюри обнаружили новый вид радиоактивного распада — позитронный, т. е. испускание положительного электрона, или β^+-распад (в отличие от электронного β^--распада).

Энрико Ферми решил получить новые искусственные радиоактивные изотопы, бомбардируя различные элементы нейтронами, а не α-частицами, как Жолио-Кюри. Ферми немалого уже достиг, пока в его руки не попал элемент уран. Тут он вдруг обнаружил, что если нейтроны предварительно замедлить, то с их помощью ядерные реакции протекают значительно интенсивнее. И вот поток медленных нейтронов обрушился на уран, и вскоре Ферми объявил о сенсационных результатах. Под действием медленных нейтронов из урана рождались новые трансурановые элементы. Эпидемия «трансурановой лихорадки» прокатилась по лабораториям физических институтов.

Но как только химики вмешались в дело, оно приняло неожиданный оборот. На дне их пробирок оседали соединения элементов, появление которых представлялось совершенно загадочным. Это были соединения лантана и бария, элементов из середины периодической системы.

Тогда немецкие ученые О. Ган и Ф. Штрасман сделали невероятное предположение: под действием медленных нейтронов ядро урана может разделиться на две части; и эти части — изотопы элементов из середины таблицы Менделеева (рис. 11). Ган тут

Мария Склодовская-Кюри (1867—1934)

Физик и химик, по национальности полька, работала во Франции, член академий многих стран, в том числе член-корреспондент Петербургской Академии наук, а затем почетный член Академии наук СССР, лауреат Нобелевских премий (1903, 1911). Склодовская-Кюри — один из основоположников учения о радиоактивных элементах, в 1898 г. совместно с мужем П. Кюри открыла радиоактивные элементы — полоний и радий и изучала свойства радиоактивного излучения. Разработала метод обработки и анализа отходов урановой руды для получения солей радия, получила радий в металлическом виде. По поручению Брюссельского радиологического конгресса Склодовская-Кюри в 1911 г. изготовила первый эталон радия, хранящийся в Международном бюро мер и весов.

же написал статью об открытии (1938). Потом он вспоминал: «После того как статья была отправлена по почте, все это показалось столь невероятным, что захотелось вернуть статью обратно из почтового ящика». Так было открыто деление урана.

Ядро урана распадалось на два осколка. При этом выделялась огромная энергия. Но вместе с осколками из погибающего уранового ядра вылетало несколько свободных нейтронов. Они могли разрушать другие ядра урана. И так далее. При благоприятных условиях в куске урана могла возникнуть так называемая *цепная реакция деления* — колоссальной мощности ядерный взрыв.

Человек осуществил процесс, которого, казалось, не знала природа. Люди еще не обнаружили в ней столь глубокое превращение элементов. Изотопы 35 химических элементов — от цинка (элемент № 30) до тербия (элемент № 65) — были найдены среди осколков деления урана.

Энрико Ферми (1901—1954)

Итальянский физик, лауреат Нобелевской премии (1938). До 1938 г. жил в Италии, с 1938 г.— в США. Внес большой вклад в развитие современной теоретической и экспериментальной физики. Ферми разработал статистику частиц, подчиняющихся принципу Паули,— так называемую статистику Ферми — Дирака (1925); создал количественную теорию бета-распада (1934); сделал ряд крупных экспериментальных и теоретических открытий в области нейтронной физики (1934—1938). В 1939—1945 гг. Ферми руководил в США исследовательскими работами в области военного применения ядерной физики. В декабре 1942 г. впервые осуществил ядерную цепную реакцию. В последние годы жизни Ферми занимался физикой высоких энергий.

Искусственные элементы

В 30-х годах нашего столетия понятие «открытие элементов» сменилось другим — «искусственный синтез элементов». К этому времени в периодической системе пустовали клетки с номерами 43, 61, 85 и 87. Неясным оставался вопрос о существовании трансурановых элементов с порядковым номером 93 и далее. Большинство этих элементов было искусственно синтезировано раньше, чем их удалось обнаружить в земных минералах.

Ученые располагали солидным арсеналом бомбардирующих снарядов: α-частицей, протоном, нейтроном, дейтроном (ядром тяжелого изотопа водорода — дейтерия). К ним прибавилась и такая крупнокалиберная «артиллерия», как ядра атомов легких элементов — бора, азота, кислорода, неона. Ученые получили чудесные установки — ускорители, которые позволяли разгонять атомные «снаряды» до очень высокой скорости. Это сильно облегчало задачу пробиться к бомбардируемым ядрам.

Первым элементом, созданным человеком, был технеций. Так назвали 43-й элемент итальянские ученые К. Перрье и Э. Сегре. Они обстреляли молибденовую пластинку дейтронами (d), и в результате ядерной реакции $^{98}_{42}\mathrm{Mo}\,(d, n)\,^{99}_{43}\mathrm{Tc}$ родился изотоп первого искусственного элемента (1937).

В 1940 г. ученые Т. Корсон, У. Мак-Кензи и Э. Сегре обстреляли быстрыми α-частицами ядра висмута. Продуктом реакции оказался изотоп другого искусственного элемента — астата, его порядковый номер 85. Потом наступила очередь прометия — 61-го элемента. С 1940 г. началась эпоха синтеза трансурановых элементов, и теперь нам известен уже изотоп элемента с порядковым номером 105. Советские физики во главе с Г. Н. Флеровым синтезировали изотоп 104-го и 105-го элементов (см. ст. «На краю таблицы Менделеева»).

Замечательной «фабрикой» некоторых искусственных элементов стал ядерный реактор. В нем происходит управляемая реакция деления урана. Среди осколков деления урана около 6% приходится на долю изотопов технеция и прометия, которые и извлекаются в довольно больших количествах. В реак-

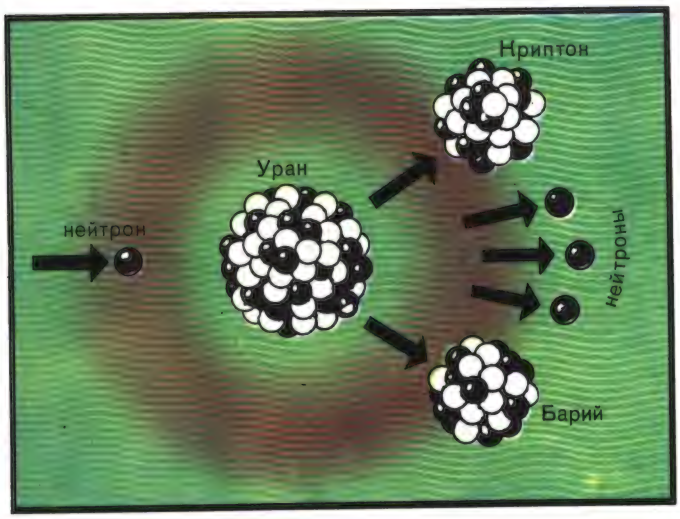


Рис. 11. Схематическое изображение деления урана под действием медленных нейтронов. Оказалось, что нейтроны хорошо замедляются в воде.

торе накапливается и трансурановый элемент плутоний (Pu). Это происходит так. «Делящимся» материалом в реакторе служит изотоп уран-235. Но помимо этого урана в реакторе есть и изотоп уран-238, ядра которого захватывают нейтроны, и начинается цепочка радиоактивных превращений:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow[\beta^-]{} {}^{239}_{93}\mathrm{Np} \xrightarrow[\beta^-]{} {}^{239}_{94}\mathrm{Pu}.$$

Земная жизнь искусственных элементов

С помощью ядерных реакций было искусственно синтезировано более 60 радиоизотопов технеция, прометия, астата и франция и более 100 изотопов трансурановых элементов. Периоды их полураспада оказались ничтожно малы по сравнению с возрастом Земли. Например, самый долговечный изотоп франция живет всего 21 мин. А наиболее устойчивый — плутоний-244 распадается наполовину за 76 млн. лет. Хотя все эти элементы «вторичные», их земное существование можно считать вполне вероятным.

Изотопы астата и франция входят в радиоактивные семейства. Но по сравнению с другими вторичными элементами они в весьма невыгодном положении — располагаются на боковых ответвлениях главных «магистралей» радиоактивных превращений. Эти ответвления объясняются способностью некоторых атомов распадаться двумя способами.

Скажем, актиний-227 в ряду урана-235 в основном способен испускать β^--частицы, электроны. Но он может выбрасывать и α^--частицу. Такое явление называют еще «радиоактивной вилкой». На «бета-зубце» этой «вилки» находится торий-227, а на «альфа-зубце» как раз изотоп редчайшего франция. Так же «рождается» и астат. Поэтому вторичные астат и франций образуются в очень малых количествах, а так как у них и периоды полураспада ничтожно малы, то им не удается накапливаться в ощутимых количествах. Поэтому-то астат и франций — редчайшие элементы Земли. С помощью очень сложных расчетов ученые доказали, что в слое земной коры толщиной 1,6 км содержится лишь несколько граммов этих элементов (см. ст. «Франций»).

Обнаружили ученые в земных минералах и первые трансурановые элементы — нептуний и плутоний. И в довольно солидном количестве: примерно 2600 т плутония и 230 т нептуния на всю массу земной коры. «Генератором» этих вторичных элементов оказывается опять-таки уран. В природе немало свободных нейтронов. Они поглощаются ядрами урана-238, и происходит та самая цепочка радиоактивных превращений, которая протекает в атомном реакторе.

К вторичным элементам можно причислить и технеций с прометием. В 1940 г. советские ученые К. А. Петржак и Г. Н. Флеров открыли совершенно новый вид радиоактивных превращений. Оказалось, что ядра урана-238 могут распадаться на два осколка примерно равного размера — распадаться не под действием нейтронов, а самопроизвольно. Чтобы доказать это, Флерову и Петржаку пришлось проводить свои эксперименты на дне глубокой шахты Московского метрополитена. Многометровая толща земли не пропускала сюда нейтроны космического излучения, которые могли исказить результаты опытов.

Уран-238 распадается самопроизвольно с очень большим периодом полураспада (около 10^{15} лет). И осколки его распада получаются в таком же обширном ассортименте, как при делении урана под действием нейтронов. Среди этих осколков есть изотопы технеция и прометия. Период полураспада самого долговечного изотопа технеция равен примерно 2 млн. лет, а прометия — всего 18 годам.

Земные ресурсы вторичных технеция и прометия совершенно ничтожны. И тем не менее в 1961 г. американские ученые Б. Кенна и П. Курода обнаружили в урановых минералах чуть приметные следы технеция. Они же в 1968 г. нашли земной прометий.

Как объясняется радиоактивность современной наукой?

Существует наука с довольно скучным названием — изотопная статистика. Она наводит строгий бухгалтерский учет для тысячи с лишним радиоактивных изотопов.

Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Снимок сделан 26 сентября 1936 г. В этот день ученые были в гостях в Москве в Физико-химическом институте им. Л. Я. Карпова.

Вспомним, какие виды радиоактивных превращений нам известны. Это α-распад, β-распад и спонтанное (самопроизвольное) деление. Обратим особое внимание на β-распад. Изотопная статистика подсчитала, что около 80% всех радиоактивных изотопов распадается по типу β-распада.

Этот распад объединяет три самостоятельных вида радиоактивных превращений. Первый вид — испускание электрона (β^--распад), второй вид — испускание позитрона (β^+-распад), третий вид обнаружил в 1937 г. американский ученый Луис Альварец. Оказалось, что некоторые ядра могут поглощать электроны с ближайших к ядру электронных оболочек. Заряд ядра-поглотителя, как и при β^+-распаде, уменьшается на единицу. Природная радиоактивность калия-40 как раз связана с тем, что ядром этого изотопа поглощается орбитальный электрон (см. рисунки 5 и 11 в ст. «Великий закон»). Если электрон поглощается ядром с K-оболочки (ближайшей к ядру), то это так называемый K-захват; если со следующей L-оболочки — это L-захват. Но он встречается крайне редко. Значит, в процессах β-распада обязательно участвует либо электрон, либо его электрический антипод — позитрон.

Ядра состоят только из протонов и нейтронов. И тем не менее при β^-- или при β^+-распадах из ядер вылетают электроны и позитроны. Модель ядра не приемлет электроны, а между тем электрон поглощается ядром при *орбитальном захвате*. Как же это понять?

А если допустить, что ядерные протоны и нейтроны не неизменны и способны превращаться друг в друга? Ядерный нейтрон может превращаться в протон, при этом вылетает электрон и заряд ядра увеличивается на единицу. Тут происходит β^--распад. Ядерный протон, в свою очередь, может стать нейтроном, а положительный заряд уносится вместе с позитроном. Заряд ядра станет на единицу меньше. Здесь мы имеем дело с β^+-распадом. Заметим, что одновременно с позитроном или электроном вылетает элементарная частица нейтрино ν (или антинейтрино $\tilde{\nu}$). Мы можем записать эти распады в виде схем:

$$n \longrightarrow p + e^- + \tilde{\nu} \quad \text{и} \quad p \longrightarrow n + e^+ + \nu.$$

А процесс орбитального захвата можем изобразить так:

$$p + e^- \longrightarrow n + \nu.$$

Выходит, что при β^--распаде ядро, теряя нейтрон, приобретает лишний протон, а при β^+-распаде и орбитальном захвате оно, наоборот, меняет протон на нейтрон. Механика на первый взгляд очень несложная.

Фредерик Жолио-Кюри (1900—1958)

Французский физик и прогрессивный общественный деятель, член Парижской академии наук и академий наук ряда стран, в том числе член-корреспондент Академии наук СССР, лауреат Нобелевской премии (1935), председатель Всемирного Совета Мира (с 1951 г.), лауреат международной Ленинской премии «За укрепление мира между народами» (1951). Совместно с И. Жолио-Кюри открыл явление искусственной радиоактивности, а также новый вид радиоактивности — позитронную радиоактивность (1934). Экспериментально доказал возможность превращения света в вещество. Ф. Жолио-Кюри провел исследования, которые привели к открытию нейтрона, первый (в середине 1939 г.) определил число вторичных нейтронов (больше двух), вылетающих при делении ядра атома урана. Он показал принципиальную возможность цепной реакции с освобождением атомной энергии.

Ирен Жолио-Кюри (1897—1956)

Французский физик, член-корреспондент Академии наук СССР, лауреат Нобелевской премии (1935), дочь П. Кюри и М. Склодовской-Кюри. Совместно с мужем Ф. Жолио-Кюри открыла явление искусственной радиоактивности (1934), экспериментально доказала возможность превращения света в вещество, открыла новый тип радиоактивности — позитронную радиоактивность. Один из искусственных радиоактивных элементов был назван в честь ученых двух поколений — кюрием.

Но почему тогда далеко не все ядра подчиняются этой механике?

Важнейшее условие устойчивости атомных ядер — отношение числа содержащихся в них нейтронов к числу протонов ($n : p$). Оно приблизительно равно 1 у изотопов легких элементов и достигает 1,6 у тяжелых. Только при определенных значениях отношения $n : p$ ядра устойчивы. При других же отношениях они способны к β-распаду.

Неустойчивы ядра с большим числом нейтронов — у них велико отношение $n : p$. Как оно может уменьшиться? Только если n станет меньше, а p — больше, если нейтрон превратится в протон, испустив электрон, т. е. путем β^--распада. Поэтому все тяжелые изотопы с избытком нейтронов оказываются β^--активными.

Когда же отношение $n : p$ мало, то у ядра появляется стремление заменить протон на нейтрон и, испустив позитрон, восстановить равновесие. Легкие радиоактивные изотопы химических элементов надо считать приверженцами β^+-распада.

Орбитальный захват — это тоже привилегия легких изотопов, стремящихся к обмену протона на нейтрон. Но встречается он главным образом у элементов, у которых внутренние электронные оболочки расположены близко к ядру, т. е. у элементов в середине и в конце периодической системы.

Почему же ядра остаются устойчивыми при каких-то «избранных» отношениях $n : p$? Может быть, эта устойчивость мнимая и ядра даже при этих соотношениях в очень слабой (необнаруженной пока) степени радиоактивны? Или же вся эта схема лишь весьма грубое приближение к действительности — своего рода «рабочая модель»?

Словом, на вопрос: «Что такое радиоактивность?» — в наше время исчерпывающего ответа еще нет.

Обратимся теперь к другим видам радиоактивного распада. *Альфа-распад* — явление частое среди радиоактивных изотопов. И главным образом у элементов конца периодической системы. Вылет α-частицы сопровождается изменением массы исходного ядра на 4, а заряда — на 2 единицы. Поэтому долгое время считалось, что к α-распаду способны только самые тяжелые, наиболее сложные ядра — ядра элементов начиная со свинца и висмута.

Каково же было удивление ученых, когда они установили, что α-распад может быть у многих изотопов редкоземельных элементов, расположенных в середине таблицы Менделеева! Отдельные изотопы лантана и церия, празеодима и неодима, самария и гадолиния, диспрозия и тербия по странной прихоти природы охотно теряют α-частицы.

Оправдать эту прихоть помогла так называемая *оболочечная модель атомного ядра*. Протоны и нейтроны слипаются в ядерный комок не в беспорядке, заявили ученые. Напротив, составные частицы ядра должны располагаться в строгом порядке. Подобно тому как электроны в атомах распределяются по оболочкам, ядерные протоны и нейтроны также разложены по «полочкам» с разными уровнями энергии, и на эти «полочки» вмещаются строго определенные количества протонов или нейтронов — 2, 8, 20, 50, 82, 126. Ядра, содержащие такие количества частиц, получили название *магических*, их можно считать своеобразными «инертными газами» в периодической системе изотопов (подробнее об этом см. в ст. «Великий закон»).

Ядра изотопов редкоземельных элементов содержат количества нейтронов, близкие к «магическому» числу 82. И эта близость, как доказали физики, способствует нарастанию вероятности α-распада. Поэтому в области редкоземельных элементов наблюдается первая на протяжении периодической системы «вспышка» α-активности. В районе классических α-излучателей (элементы конца таблицы Менделеева) дает себя знать близость оболочки из 126 нейтронов. В целом 16% радиоактивных изотопов распадаются, испуская α-частицы.

Спонтанное (самопроизвольное) *деление* — это самый кардинальный тип радиоактивных превращений. Он встречается только у очень тяжелых ядер. Ему подвержены многие α^--активные ядра, а в особенности изотопы трансурановых элементов. У ядер элементов, находящихся в соседстве с ураном, спонтанное деление — явление очень редкое. Если бы в природе существовало только спонтанное деление, то, например, из 1 г изотопа тория-232 осталось бы 0,5 г за колоссальный срок, который даже трудно себе представить, — 10^{21} лет. Этот изотоп распадается гораздо быстрее благодаря α-распаду.

С ростом заряда в ядре вероятность самопроизвольного деления стремительно нарастает, и, например, у изотопа менделевия-256 (порядковый № 101) период полураспада по спонтанному делению равен всего 30 мин. Физики установили четкий критерий способности ядра к самопроизвольному делению. Он измеряется отношением квадрата заряда ядра Z к атомной массе A (массовому числу) изотопа. Как только величина $Z^2 : A$ достигает значения 44,5, самопроизвольное деление становится вероятным.

Оболочечная модель ядра не может объяснить механизм спонтанного деления. Приходится привлекать для этого другую модель — *капельную*. Ученые давно проводили аналогию между свойствами ядра и свойствами капли жидкости. Если капле сообщить

достаточную энергию, привести ее в движение, то она может разделиться на более мелкие капли. Подобным же образом и ядро, если оно, как говорят физики, придет в возбужденное состояние, способно делиться — либо под действием нейтронов, либо самопроизвольно.

Сколько видов радиоактивных превращений существует?

История исследований радиоактивности протекала примерно так же, как и история любой другой науки: ученые сначала открывали те процессы и явления, которые, так сказать, лежали на поверхности. Не мудрено поэтому, что испускание ядер гелия и электронов удалось обнаружить уже вскоре после работ Беккереля. Зато открытие позитронного распада, орбитального захвата, самопроизвольного деления потребовало уже специальных знаний и сложных приборов.

Удастся ли нам еще пополнить перечень видов радиоактивных превращений?

Теоретики уже давно предсказывали новый вид радиоактивности — так называемую *протонную радиоактивность*. Те изотопы, полагали ученые, у которых в ядрах очень мало нейтронов (мало отношение $n : p$), могут самопроизвольно испускать протон. Наши экспериментаторы во главе с Г. Н. Флеровым доказали это на опыте. Теоретики полагают, что возможна и двухпротонная радиоактивность.

Теория предсказывает также, что должно пополниться «семейство» β-распадов. Его предполагаемый член именуется в науке *двойным* β^-*-распадом*. Некоторые ядра смогут испускать одновременно два электрона, а два нейтрона — превращаться в протоны. Можно насчитать немало ядер, у которых предполагается $2\beta^-$-радиоактивность. Периоды их полураспада должны быть огромными.

А дальше?

Нисколько не фантастично предположить, что еще наше поколение пополнит перечень видов радиоактивных превращений.

Вот, если хотите, тема для размышлений. Маленькая аналогия из области истории науки. Прежде чем было открыто самопроизвольное деление урана, ученые узнали об искусственном делении его ядер под действием медленных нейтронов. Механизм обоих процессов одинаков, состав осколков один и тот же.

Сейчас в ядерной физике широко известен процесс расщепления тяжелых ядер под действием быстрых частиц, например протонов. Они откалывают от ядер «куски», «фрагменты» самого различного размера. В процессе расщепления получаются изотопы почти всех химических элементов таблицы Менделеева.

А может быть, подобное радиоактивное превращение протекает и естественным образом? Может, ядра элементов конца периодической системы самопроизвольно испускают «фрагменты» более крупные, чем α-частицы? Например, легкие ядра лития, бериллия, углерода, азота? Любопытно, что эта идея *«фрагментарной» радиоактивности* не так уж нова: еще в 1926 г. английский ученый П. Фут доказывал, что уран обладает своеобразной «азотной» радиоактивностью, т. е. его ядра способны выбрасывать ядра азота.

Несомненно одно: атомы куда более изобретательны в выборе вида радиоактивности, чем представляем мы себе сейчас. Но когда ученые пытаются в этой изобретательности разобраться поглубже, они упираются в слабое знание «внутренней жизни» атомных ядер.

Гамма-лучи

Мария и Пьер Кюри разделили лучи, открытые Беккерелем, на три пучка: α-частицы, β-частицы и γ-лучи. До сих пор мы говорили только о первых двух пучках. Гамма-лучи также играют большую роль во многих видах радиоактивного распада. У этих лучей много общего с рентгеновскими лучами. И те и другие представляют собой электромагнитные излучения. Только длина волны у γ-лучей значительно короче. Насколько известно, в природе вообще нет волн более коротких, чем γ-лучи.

Рентгеновские лучи возникают в атоме в результате перехода электронов с одной оболочки на другую, более глубокую. Энергия, выделяющаяся в этом процессе, проявляется внешне в виде рентгеновского излучения. У γ-лучей уже не электронная, а ядерная природа. Атомное ядро, приобретя некоторый избыток энергии, приходит в возбужденное состояние. Оно стремится избавиться от излишней энергии и перейти в обычное (невозбужденное) состояние. Когда же такой переход происходит, выделяется γ-квант, рождаются γ-лучи. Квант — это определенное, наименьшее из возможных количество энергии.

Ядро, образовавшееся в результате α- или β-превращения, обычно приходит в состояние возбуждения. Поэтому α- и β-распады часто сопровождаются

Рис. 12. Примеры изотопов (число протонов одинаково, число нейтронов различно), изобаров (число протонов и нейтронов различно, одинаковы их суммы) и изомеров (число протонов и нейтронов одинаково, различны энергии ядер).

γ-излучением. При γ-излучении превращения элементов не происходит.

Гамма-квант может, еще не вылетев за пределы атома, передать свою энергию одному из электронов (такое явление в науке называется *внутренней конверсией*). Электрон, поглотивший γ-квант, вылетает из атома, а на его место переходит электрон с другой оболочки. При переходе электронов с оболочки на оболочку появляются рентгеновские лучи.

Мы уже говорили о ядрах-родственниках — изотопах. У изотопов какого-либо элемента одинаковое количество протонов и различное количество нейтронов. Исследование γ-лучей позволило ученым обнаружить в мире атомов и другие родственные группы: изобары и изомеры (рис. 12).

Изобары принадлежат разным элементам, но имеют одинаковые массовые числа, одну и ту же сумму протонов и нейтронов, хотя количества протонов у них различны. Например, изотопы бериллий-10 и бор-10 — изобары.

Изомеры на первый взгляд ничем не различаются, у них равны не только суммы, но и в отдельности числа протонов и нейтронов. Но способность к радиоактивности у них различна. Ядро у одного изомера распадается быстрее, чем у другого. Это объясняется тем, что их ядра находятся в различных энергетических состояниях: одно возбуждено, другое — нет. Так, например, у протактиния-234 два изомера. Возбужденное ядро одного из них распадается с периодом полураспада 1,18 мин, а невозбужденное ядро другого распадается наполовину за 6,7 ч. Возбужденное ядро переходит в невозбужденное состояние, испуская γ-лучи. Сейчас ученым известно более 200 изомерных пар.

О нуклонах

Какие бы удобства ни представляла протонно-нейтронная модель ядра, она все-таки лишь схема, которая более или менее удачно объясняет факты, накопленные ядерной физикой.

Физики в конце концов пришли к весьма неожиданному выводу. «Чистых» протонов и нейтронов в ядре нет. Есть некое ядерное вещество. Отдельные «кусочки» этого ядерного вещества — *нуклоны* могут существовать в двух состояниях: иметь положительный заряд или вообще не иметь заряда. Эти два состояния могут превращаться друг в друга. Внешне такое превращение выглядит как превращение нейтрона в протон или наоборот. И объяснять природу ядерных сил теперь пытаются, рассматривая обмен мезонами между двумя нуклонами.

В последние годы ученые решили выяснить, как устроен нуклон. Для этого потребовались весьма тонкие и сложные эксперименты, весь арсенал знаний, накопленных ядерной физикой. Им удалось определить размер нуклона, его радиус. Радиус ядра был известен физикам уже давно. Он равен в среднем $1{,}35 \cdot 10^{-15}$ м (для сравнения укажем, что радиус простейшего атома — атома водорода — 10^{-10} м). Плотность ядерного вещества чудовищно велика — около $2 \cdot 10^{11}$ кг/м^3, т. е. примерно 200 млн. т в 1 см^3. Если бы из вещества подобной плотности удалось изготовить шар радиусом 200 м, его масса была бы равна массе планеты Земля.

Ученые представляют себе строение нуклона так. В центре его находится своеобразное ядрышко — керн. Его радиус примерно равен $0{,}3 \cdot 10^{-15}$ м. Керн окружен «облаком», состоящим из мезонов. Что представляет собой керн, пока еще неизвестно. Мы знаем о нем еще меньше, чем о строении ядра Земли.

Нуклоны, находящиеся в положительно заряженном состоянии (протоны), и нуклоны, не имеющие заряда (нейтроны), ведут себя по-разному. Нуклоны остаются для ядерной физики загадкой № 1, а точная расшифровка их строения помогла бы ответить на множество важнейших вопросов. В том числе и на такой: что же такое радиоактивность?

Маленькая интермедия

В 1896 г. Анри Беккерель открыл радиоактивность. Пятьдесят лет спустя над пустыней Лос-Аламос вырос ядовитый атомный «гриб». Еще через 10 лет со стапелей ленинградской судоверфи сошел первый в мире атомный ледокол «Ленин». За короткий срок атом, который считался неизменным, стал и атомом-разрушителем и атомом-созидателем.

На первых порах природа зашифровала новое для науки явление — радиоактивность. Неизмерим труд сотен ученых, которые в разных странах переводили таинственные знаки природы на конкретный язык науки. И сейчас радиоактивность представляется нам огромной и интересной книгой. В ней еще не написаны многие строки и даже целые страницы. Эту книгу предстоит дописывать грядущим поколениям ученых.

Трудно переоценить значение радиоактивности для судьбы Земли. Радиоактивность «повинна» в том, что наша планета, которая сначала была холодным шаром, постепенно разогревалась. Ее согревало тепло радиоактивного распада урана, тория и неустойчивого изотопа калия.

Земные элементы живут. Они гибнут и рождаются. Одни элементы превращаются в другие. Радиоактивный распад приводит к тому, что в земном шаре изменяется содержание изотопов различных элементов. Происходит медленное исчезновение менее устойчивых и накопление более устойчивых изотопов.

А тут еще кроме внутренних ядерных сил в жизненные процессы элементов вмешиваются силы внешние: бесчисленное множество ядерных реакций, протекающих в земной коре; частицы, входящие в состав космического излучения; свободные нейтроны. Такие внешние силы дополнительно вызывают превращение химических элементов на Земле.

Но известны далеко не все эти внешние силы: наука только-только начала изучать подобные ядерные реакции, происходящие в природе. Мы стоим сейчас на пороге той, пока загадочной области знаний, которую следовало бы назвать эволюцией химических элементов на Земле.

Радиоактивность не частная привилегия земных элементов. Куда необъятнее темы «Вселенная и радиоактивность», «Вселенная и ядерные реакции». Космос — это подмостки гигантской сцены, на которой разыгрываются целые трагедии в мире химических элементов. И разыгрываются в масштабах, которые трудно себе представить.

Пример такой трагедии — происхождение химических элементов. Во Вселенной идет вечный процесс образования элементов, всех элементов, которые на Земле расположились в клетках великой карты — периодической системы Менделеева.

Почему светят звезды?

Ученые давно искали ответ на этот вопрос. Химики говорили: в недрах звезд происходят гигантские химические процессы горения. Физики подсчитывали, размышляли, делали вывод: «Заблуждение! Химические реакции не могут выделять такое громадное количество тепла. Звезды светят миллиарды лет, а запасов химического топлива хватило бы очень ненадолго».

Исследователи радиоактивности придерживались иных взглядов: «Звезды — это гигантские кладовые радиоактивных элементов. Даже таких тяжелых, которые неизвестны на Земле. Тепло их распада и питает вечный звездный огонь». Теоретики исписывали горы бумаги и разводили руками: в тепловом балансе звездного хозяйства концы не сходились с концами. Радиоактивный распад при всем его могуществе не мог быть источником светимости звезд.

Шведский ученый Сванте Аррениус первым назвал совершенно неожиданный источник энергии звезд. Он предположил, что существует природный процесс, при котором легкие атомы, например водород, могут соединяться в более тяжелые: «Гелий представляет собой важный элемент на пути от водорода к более тяжелым элементам».

Если перевести слова Аррениуса на язык современной науки, то они будут звучать так: основа энергетического богатства звезд — превращение ядер водорода в ядра гелия. А если в звездах происходит процесс постепенного усложнения атомных ядер, то это основная идея, на которой можно стро-

ить предположения о путях происхождения всех химических элементов.

В 1928 г. физики-теоретики австриец Хоутерманс и американец Аткинсон превратили гипотезу Аррениуса в научную теорию. Они показали, по каким последовательным ступенькам происходит превращение водорода в гелий, и подсчитали, что этот простейший синтез ядер может очень долгое время разогревать небесное светило. Ведь при превращении 1 г водорода в гелий выделяется 1250 млрд. Дж тепла. Этого превращения вполне достаточно, чтобы, скажем, Солнце могло щедро одаривать Землю своими лучами многие миллиарды лет. Подавляющее большинство известных нам звезд фактически состоит из водорода и гелия. Прочие элементы на них лишь небольшая примесь. Если на Земле преобладают кислород и кремний, то в космосе наиболее распространены именно водород и гелий — самые первые, самые легкие элементы периодической системы.

Но гелий может рождаться из водорода только при очень высоких температурах. Самые легкие ядра вступают в термоядерные реакции, если в звездных недрах господствует очень высокая температура — 10 МК. Чтобы гелий мог превращаться в более тяжелые элементы, такой температуры уже недостаточно.

Астрофизик Ганс Бете в 1938 г. подсчитал: тот максимум температуры, на который «способны» недра обычных звезд, не превышает 20 МК. Но при такой температуре ядерный синтез не пойдет дальше образования гелия.

Одно из двух: или звезды — неподходящие «фабрики» химических элементов и те каким-то неведомым способом образовались, когда и самих-то звезд еще не существовало, или следует искать особые, сверхгорячие звезды, раскаленные до миллиардов кельвинов.

«Весь мир за пятнадцать минут»

Ученые стали развивать теории дозвездного образования элементов. Воображение рисовало им потрясающие температуры в сотни миллиардов кельвинов, огромные давления, вещество, сжатое до предела, с такой большой массой, что маленькая его крупинка имела бы массу больше массы Земли. В подобных условиях и могли синтезироваться все элементы.

...Если бы в науке было принято рекламировать ту или иную теорию, то суть так называемой альфа-бета-гамма-теории можно было бы выразить фразой: «Весь мир за пятнадцать минут». Ее авторы — ученые Х. Альфвен, Х. Бете и Г. Гамов. Теорию назвали начальными буквами греческого алфавита по созвучию с фамилиями этих ученых. Ее смысл: все элементы образовались раньше, чем появились сами звезды. В основе этой теории...

Впрочем, сначала обратимся к нашему старому знакомому — нейтрону. Как ведет себя свободный нейтрон, не связанный с другими частицами крепкими путами ядерных сил? Оказывается, он совсем не так устойчив, как хотелось бы думать. Он может превратиться в протон. Словом, нейтрон подвержен β^--распаду. И период полураспада нейтрона очень мал: около 12 мин.

На этой особенности нейтрона и построили свои умозаключения Альфвен, Бете и Гамов. Их теория начиналась подобно сказке: «Давным-давно во Вселенной не было звезд. А вся материя космоса представляла собой огромный сгусток. Этот сгусток состоял из одних лишь нейтронов». Это «полинейтронное ядро» было сжато таким чудовищным давлением, что нейтроны даже не могли распадаться. Но время шло. «Ядро» постепенно начало расширяться. Нейтроны получили, наконец, некое подобие свободы. Первые нейтроны превратились в первые протоны. Протоны стали объединяться с нейтронами в ядра дейтронов — тяжелых изотопов водорода. Те в свою очередь поглощали новые нейтроны, и рождались разновидности водородных атомов с массовыми числами 3, 4, 5, 6 и более — ядра, чрезмерно перегруженные нейтронами. Но такие ядра, как мы знаем, предрасположены к β^--распаду. Водород превращался в гелий, а изотопы гелия начинали насыщаться нейтронами.

Так потянулась длинная цепь последовательных нейтронных захватов и β-распадов. И все изотопы всех химических элементов, вплоть до очень тяжелых, стали звеньями этой цепи. Альфа-бета-гамма-теория успешно объяснила ход кривой космической распространенности элементов, а ведь правильное объяснение этой кривой — пробный камень вообще всех теорий происхождения элементов. Но главная сенсация была впереди. Математические расчеты позволили вычислить, сколько времени потребовалось бы на весь этот невообразимо гигантский процесс. Не миллиарды, не сотни тысяч лет, даже не сутки. Всего-навсего — 15 мин. За четверть часа должны были образоваться из нейтронного «ничто» все известные во Вселенной химические элементы! За 15 коротких минут, и не более, потому что потом оста-

лось бы слишком мало свободных нейтронов и наступил бы логический конец синтеза.

Но эффектные теоретические построения Альфвена и его коллег не могли объяснить два мелких факта. Ведь в ходе захвата нейтронов должны были образоваться все без исключения изотопы химических элементов. В том числе гелий-5 и бериллий-8. Но ядра этих элементов характерны тем, что о них нечего сказать. Теоретики подсчитали: ядро бериллия-8 может существовать всего 10^{-16} с. Значение времени, мало доступное воображению. А гелий-5 неустойчив совершенно. Однако без этих ядер, без их непременного образования альфа-бета-гамма-теория обойтись не могла. Из цепи вырывалось два звена, и цепь распадалась.

Новый путь к синтезу элементов тяжелее гелия завел в тупик. И выход из этого тупика обнаружился самым неожиданным образом.

Ключ дает технеций

Элемент технеций ученые сначала синтезировали в 1937 г. искусственно. Только в 1961 г. его следы обнаружились в земных минералах. Но еще в 1950 г. технеций подал весть о своем существовании с ослепительной поверхности Солнца. Его следы обнаружила в солнечном спектре Шарлотта Мур — американский астрофизик. Затем присутствие технеция в некоторых звездах доказал англичанин Меррил. Это событие бросило новый свет на проблему происхождения химических элементов.

Звезды живут миллиарды лет. Период полураспада самого долгоживущего изотопа — технеция-99 — около 2 млн. лет. «Солнечные» условия не способны продлить его жизнь. Ведь на радиоактивный распад не влияют самые высокие температуры. Сопоставление этих двух фактов рождает загадку. Откуда берется технеций на Солнце и в звездах? Почему он существует сейчас, если уже давным-давно должен был распасться?

Вывод может быть только один: и поныне технеций непрерывно образуется на Солнце и в звездах. А раз так, то должны существовать в звездах такие условия, которые благоприятны для синтеза элементов тяжелее гелия.

От гелия до висмута

Звезды не мертвые тела. Они живут и в своем развитии проходят разные стадии — стадии эволюции, как говорят астрофизики. На первой стадии в ядре звезды протекает термоядерная реакция «сгорания» (превращения) водорода в гелий. Этот процесс тянется миллион лет. Постепенно «запасы» водорода в центре звезды сходят на нет, зато гелия становится все больше и больше. Состав ядра и состав оболочки звезды становятся различными.

И тут звезда изменяет свое спокойное поведение. Ее оболочка начинает расширяться, а ядро, напротив, сжимается. Сжатие повышает температуру, и она достигает в центре звезды 150 млн. К.

Теперь ядра гелия начинают сливаться друг с другом, и включается механизм так называемого α-синтеза. К образующимся ядрам присоединяются новые α-частицы. Сначала три α-частицы сливаются в ядро углерода-12. Дальнейшую цепочку синтеза в терминах ядерной физики можно записать так:

$$^{12}C(\alpha, \gamma)\,^{16}O(\alpha, \gamma)\,^{20}He(\alpha, \gamma)\,^{24}Mg,$$

где γ означает испускание γ-лучей.

Мы оборвали эту цепочку на магнии не случайно. Тут α-синтез прекращается, потому что 150 млн. К не хватает для образования последующих элементов.

Но ведь до технеция α-синтез так и не дошел. У магния порядковый номер 12, у технеция — 43. Разница между ними равна 31. Еще 31 элемент каким-то путем должен был образоваться, чтобы технеций мог салютовать земным ученым с далеких звездных миров...

Быть может, звезда за счет чего-то получает дополнительный подогрев? Однако за счет чего именно? Ведь теперь речь идет о температурах уже в миллиарды кельвинов. Только в этом случае образование элементов может шагнуть за магний. Где найти такое громадное количество тепла — совершенно неясно.

Хотя альфа-бета-гамма-теория лопнула как мыльный пузырь, от нее осталась вполне материальная «капля». В этой «капле» сосредоточилось то единственно ценное, что было в злополучной теории: синтез химических элементов проходит с участием нейтронов.

Нейтрон, как мы знаем,— всемогущее орудие при осуществлении ядерных реакций. Ему безразлично, каковы внешние условия: царит ли сковывающий холод или нестерпимый жар. Он с одинаковым успехом добирается до атомного ядра. Если допустить,

что в дело вмешается процесс захвата нейтронов, тогда цепочка синтеза элементов потянется дальше. Для этого нужны свободные нейтроны, много свободных нейтронов. Их источники должна была отыскать изобретательная мысль ученых.

В звездах существуют ядра двух атомов: углерода-13 и неона-21. Они образуются на предыдущих стадиях эволюции звезды. Как именно — вопрос сложный. Мы не будем на нем задерживаться. Примем сам факт.

Можно представить себе, что ядро углерода-13 как бы составлено из трех α-частиц плюс один нейтрон. В ядре неона-21 пять α-частиц терпят нежелательное соседство единственного нейтрона. Нежелательное потому, что ядра, состоящие целиком только из α-частиц, очень устойчивые системы (кроме бериллия-8). Нейтрон же в этих ядрах как инородное тело, и они стремятся от него избавиться, поменяв на α-частицу. Словом, происходят ядерные реакции: ^{13}C (α, n) ^{16}O и ^{21}Ne (α, n) ^{24}Mg. Для синтеза элементов появляется вполне достаточное количество свободных нейтронов.

Теперь-то и вступает в действие тот механизм, которым пыталась объяснить образование всех элементов альфа-бета-гамма-теория. Начинается процесс медленного захвата нейтронов. Медленного потому, что промежуток времени между двумя последовательными захватами нейтронов велик по сравнению с периодами полураспада образующихся изотопов. Только изотопы с большими периодами полураспада способны к дальнейшим превращениям. Менее долговечные изотопы превращаются в стабильные раньше, чем успеют захватить очередной нейтрон. Так рождаются многие элементы, в том числе и технеций.

Этот механизм синтеза элементов выключается на висмуте (порядковый № 83). Следующие за ним элементы недолговечны. Они распадаются раньше, чем получают возможность захватить нейтрон.

Рождение и гибель Сверхновых звезд

Эти события случаются буквально раз в столетие. В далеком уголке небесной бездны неожиданно вспыхивает звезда необычной яркости. С каждым днем она теряет свой блеск, тускнеет, невооруженный глаз уже не может разглядеть ее. И наконец исчезает. Почти так же неожиданно, как и появилась. Словно и не было никакой вспышки. Такие удивительные звезды астрономы и астрофизики называют *Сверхновыми*.

Взрыв Сверхновой — настоящая космическая катастрофа. При ее вспышке выделяется чудовищное количество энергии. По самой грубой оценке, оно могло бы образоваться при одновременном взрыве многих миллиардов самых мощных водородных бомб. Ученые пока не могут объяснить истинную причину появления Сверхновых. А понять эту причину было бы крайне важно для окончательного выяснения картины происхождения элементов.

Светимость Сверхновых спадает согласно определенному закону: ее величина через определенный интервал уменьшается в одно и то же число раз. Такой вид изменений в природе встречается часто. К ним относится и радиоактивный распад. Через время, равное периоду полураспада, начальная масса радиоактивного вещества уменьшается вдвое. И в два раза меньшим становится суммарное значение энергии распада.

Оказалось, что через каждые 55 суток Сверхновые звезды делаются вдвое менее яркими. Такое убывание светимости навело ученых на смелую мысль. А что если выделение энергии после взрыва Сверхновой объяснить радиоактивным распадом какого-нибудь изотопа с периодом полураспада в 55 сут? Из тысячи известных радиоактивных изотопов оказались подходящими только два: бериллий-7 и стронций-89. Они распадаются наполовину как раз за 55 сут. Но та энергия, которая выделяется при их β-распаде, так мала, что даже на краткий миг не способна была бы обеспечить блеск Сверхновых, даже если допустить, что эти звезды почти целиком состоят из бериллия или стронция.

Новый претендент обнаружился среди элементов, которые были синтезированы учеными. Это был трансурановый элемент калифорний с порядковым номером 98. Его изотоп — калифорний-254 удалось приготовить массой всего около 30 миллиардных долей грамма. Но и этой пылинки оказалось достаточно, чтобы измерить период полураспада: он оказался равным 55 сут.

И тогда появилась гипотеза: энергия самопроизвольного деления калифорния-254 служит источником светимости Сверхновой в течение почти двух лет — до тех пор пока весь калифорний не распадется.

Но как синтезируется сам калифорний? Ведь мы остановились на том, что механизм образования элементов отключился на висмуте. Перед взрывом Сверхновой все ядерные реакции в звезде идут особенно интенсивно, в том числе и взаимодействие с α-частицами уже знакомого нам неона-21. За корот-

кий промежуток времени рождается громадное количество нейтронов. Ядра успевают на этот раз поглотить нейтроны быстрее, чем произойдет их β-распад. Неустойчивость элементов с массой, большей массы висмута, уже не станет мешать синтезу. Цепь превращений будет удлиняться и приведет к образованию очень тяжелых элементов, среди них и калифорния.

Ученые произвели любопытный расчет. Оказывается, при каждом взрыве Сверхновой образуется поистине фантастическая масса этого самого калифорния-254. Если ее выразить в тоннах, то мы получим число, равное единице с 23 нулями. Это в 20 раз больше массы нашей Земли.

Недавно выяснилось, что период полураспада калифорния-254 равен 60 сут. Смелая догадка оказалась под сомнением. Стало быть, нужна новая гипотеза.

...Гибнет Сверхновая — и на месте ее ослепительной вспышки останется лишь маленькая, тусклая звездочка. Она отличается необычайно высокой плотностью вещества. Эти «трупы» Сверхновых называют *белыми карликами*. Что с ними происходит далее, пока неизвестно. А то громадное количество материи, которое выбрасывается при взрыве Сверхновой в пространство Вселенной, может сгущаться и образовывать новые звезды. Эти звезды начнут новую жизнь, и в них будет происходить великий процесс синтеза элементов. Но, быть может, он пойдет иным путем, отличным от того, с которым мы познакомились.

Теория происхождения элементов еще очень далека от завершения. Многим поколениям ученых предстоит глубже и глубже познавать истину. Рождение, жизнь и смерть химических элементов — это гигантский единый процесс. И люди уловили эту закономерность природы пока только в самых общих чертах, как художник, который сделал на холсте первые мазки картины: он знает, что будет писать, но еще не знает, как это будет выглядеть.

Атомный реактор

Атомные реакторы открыли человечеству дорогу для практического использования огромных запасов энергии, скрытых в ядрах атомов.

Первый атомный реактор был построен в декабре 1942 г. в Чикаго (США) под руководством итальянского физика Энрико Ферми в разгар второй мировой войны. Этот реактор строился в условиях строжайшей секретности, так как конечной целью работ было создание атомной бомбы.

Примерно в это же время и в нашей стране возобновились работы физиков над овладением энергией атома, прерванные нападением фашистов. Руководил работами академик Игорь Васильевич Курчатов. Позднее Курчатов писал:

«В первую очередь безграничные ядерные силы были направлены на изготовление разрушительного оружия.

Я, как и все советские люди, убежден, что здравый смысл, присущий народам, восторжествует, и недалеко то время, когда уран-235 и плутоний будут использоваться в атомных двигателях, движущих мирные корабли и самолеты, и на электростанциях, несущих в жилища людей свет и тепло».

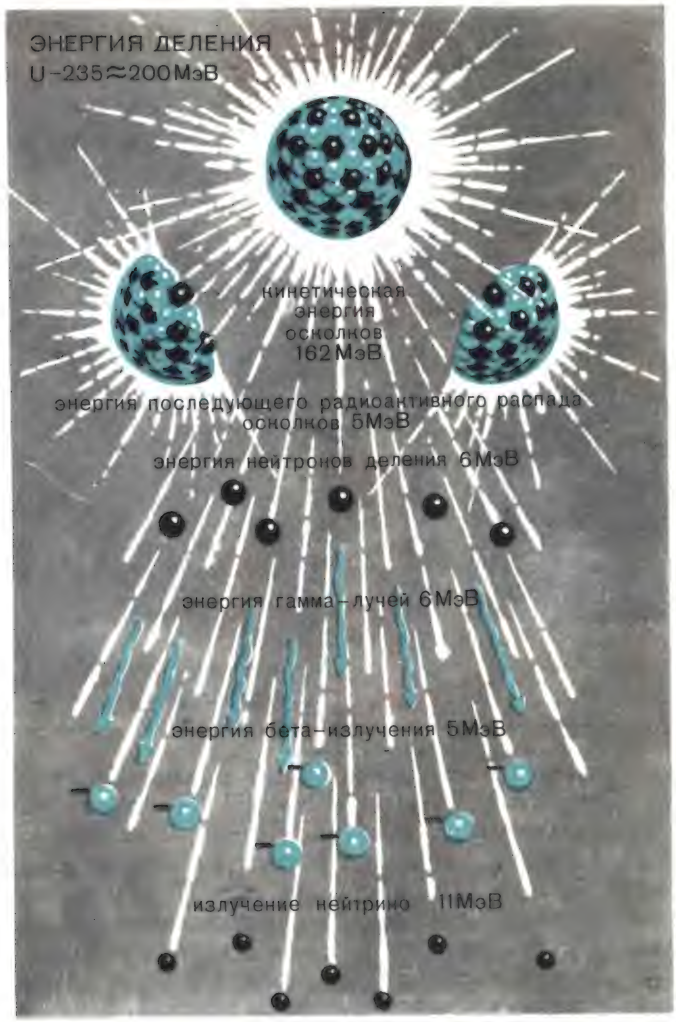
Уже в 1954 г. в Советском Союзе дала энергию первая в мире атомная электростанция. Мощность этой станции была всего 5000 кВт.

Теперь атомные электростанции успешно конкурируют с лучшими тепловыми электростанциями и достигают мощности 1 000 000 кВт. Воды морей и океанов бороздят суда с ядерными энергетическими установками.

Атомные реакторы дали возможность производить в большом количестве радиоактивные изотопы, которые помогли ученым проникнуть во многие тайны биологических и химических процессов, широко использовать радиоактивные препараты в медицине для диагностики и лечения, получить новый метод исследования чистоты веществ — нейтронно-активационный анализ.

Атомный (или ядерный) *реактор* — устройство, в котором осуществляется самоподдерживающаяся управляемая цепная реакция деления ядер атомов тяжелых элементов, чаще всего урана.

В атомном реакторе используется способность ядер урана при попадании в них нейтронов делиться (расщепляться) на две приблизительно равные части и выбрасывать при этом два или три вторичных нейтрона на каждый нейтрон, вызвавший деление. При делении ядра урана испускается больше нейтронов, чем затрачивается на этот процесс, — это позволяет создать условия для саморазвивающейся цепной реакции.



Такое количество энергии выделяется при делении ядра атома урана-235 и уносится различными видами излучений.

Деление ядер урана при облучении их нейтронами было открыто в 1939 г. немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрасманом.

В связи с этим открытием Курчатов писал: «Я вспоминаю, как мне и другим, тогда еще сравнительно немногочисленным физикам-ядерщикам стало ясно, что проблема получения ядерной энергии разрешима».

Главные трудности

Ядра атомов природного урана не одинаковы. Различаются три его изотопа с атомными массами 234, 235 и 238. Ядер урана-238 в природной смеси изотопов больше всего — 99,3 % от общего количества ядер. Урана-235 значительно меньше — 0,7 %. И всего одно ядро урана-234 приходится на 17 000 ядер урана-238, поэтому обычно о нем и не упоминают.

Под воздействием нейтронов делятся ядра урана-235, ядра урана-238 гораздо устойчивее и почти не делятся, а захватывают попадающие в них нейтроны. А так как ядер урана-238 в 140 раз больше, чем ядер урана-235, то практически все вылетающие при делении урана-235 нейтроны поглощаются ураном-238, поэтому цепной реакции деления ядер в природном уране не возникает.

Однако это препятствие удалось преодолеть. При изучении процессов деления урана было обнаружено, что не всякий нейтрон, проникающий в ядро урана, вызывает деление этого ядра. Большая часть нейтронов пронизывает ядра, не вызывая деления. Оказывается, что чем меньше скорость нейтрона, попадающего в ядро, чем меньше его кинетическая энергия, тем больше вероятность деления ядра. Легче всего деление ядер урана-235 происходит под воздействием медленных (так называемых тепловых) нейтронов, скорость которых близка к скорости теплового движения атомов. Тепловые нейтроны имеют энергию 0,025 эВ. У каждого нейтрона, вылетающего при делении ядра урана-235, энергия в среднем около 2 МэВ, т. е. это быстрый нейтрон. Значит, для того чтобы осуществить цепную реакцию деления ядер урана-235 на естественном уране, нужно каким-то способом замедлить быстрые нейтроны до тепловых скоростей, причем так, чтобы в процессе замедления нейтроны не терялись. Для замедления нейтронов используется их свойство упруго рассеиваться при столкновении с ядрами атомов ряда веществ, которые называют *замедлителями*. Подобно тому как при столкновении двух упругих шариков происходит частичная передача энергии от одного к другому, при упругом рассеянии происходит передача энергии от нейтрона к ядру атома замедлителя. И после ряда упругих соударений энергия нейтрона становится тепловой.

Было очевидно, что в качестве замедлителей выгодно использовать вещества с малой атомной массой. Ведь чем тяжелее неподвижный шарик, в который ударяется шарик движущийся, тем меньшую долю своей энергии он передает неподвижному шарику. А при равенстве масс шариков движущийся передает неподвижному всю энергию, а сам останавливается.

Самые легкие атомные ядра — ядра водорода. Однако водород довольно сильно поглощает тепловые нейтроны и поэтому не может использоваться для осуществления цепной реакции на природном уране. Только дейтерий (в виде тяжелой воды), углерод (в виде графита) и бериллий могут быть использованы как замедлители. Казалось бы, успех близок, хороший замедлитель найден. Но на пути к цели природа поставила еще одно препятствие. Мы

Вот что получится, если разделить природный уран на изотопы.

уже знаем, что природный уран в основном состоит из атомов урана-238. Оказалось, что ядра урана-238 жадно захватывают нейтроны с энергией от 1000 до 5 эВ, а все появившиеся в результате деления ядер урана быстрые нейтроны в процессе замедления до тепловых скоростей должны пройти через эту область энергии, которую назвали *областью резонансного захвата*. Значит, замедляясь, нейтроны, захваченные ядрами урана-238, должны теряться.

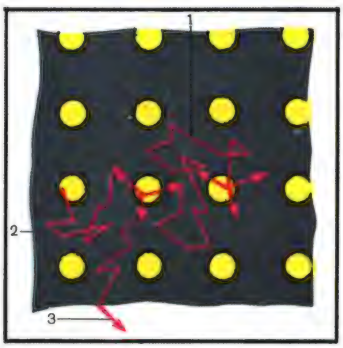
Эту трудность тоже удалось преодолеть. Уран решили не смешивать с замедлителем, а распределять его в среде замедлителя в виде отдельных блоков (шаров или стержней) на таком расстоянии друг от друга, чтобы быстрые нейтроны, вылетевшие из урана, замедлялись до энергий ниже опасных энергий резонансного захвата раньше, чем могли снова попасть в уран. Движение нейтронов в такой «решетке» из урана и замедлителя показано на рисунке (стр. 301, *слева*). Такое неравномерное расположение урана в замедлителе принято называть *гетерогенным*, а равномерное (в виде смеси или раствора) — *гомогенным*.

И еще одно условие: уран и графит (или другой материал, используемый в качестве замедлителя) должны быть очень чистыми. Особенно важно, чтобы содержание в них веществ, интенсивно поглощающих тепловые нейтроны (бора, кадмия и ряда редкоземельных элементов), было ничтожно малым. Материалов такой чистоты до создания атомных реакторов нигде в мире не производилось. Потребовалась долгая и упорная работа, чтобы научиться делать материалы нужного качества.

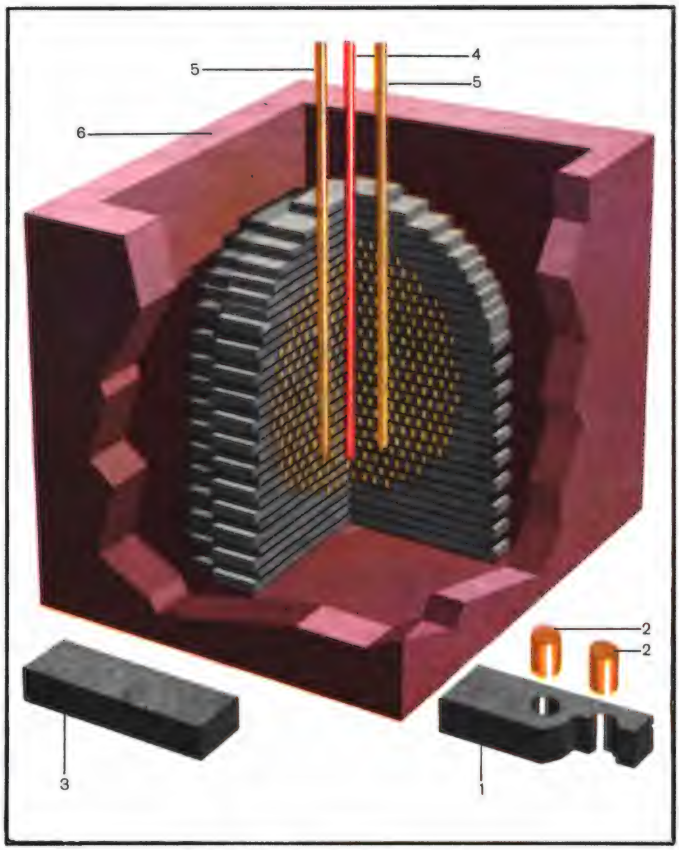
Сердце реактора

Уран и *замедлитель* — сердце реактора, его активная зона. Чтобы реактор мог работать, размер его активной зоны должен превышать определенную *критическую* величину, иначе цепная реакция не разовьется, так как большая часть нейтронов, образующихся при делении урана, будет вылетать наружу и теряться, не вызывая делений. При увеличении объема активной зоны отношение количества теряющихся нейтронов к остающимся в зоне уменьшается, так как отношение поверхности шара к его объему уменьшается по мере увеличения радиуса.

Так возникает цепная реакция на тепловых нейтронах в природном уране.



Такой путь в замедлителе проходят нейтроны, вылетевшие из ядра урана при делении: *1* — путь нейтрона, который успел замедлиться и вызвал новое деление, попав в урановый стержень; *2* — путь нейтрона, который попал в ядро урана-238, не успев замедлиться до тепловой скорости, и был поглощен этим ядром; *3* — путь нейтрона, вылетевшего за пределы активной зоны (кружочками показаны урановые стержни).



Простейший уран-графитовый реактор (в разрезе). Внутренняя часть выложена в виде шара из графитовых брусков с отверстиями (*1*), в которые заложены урановые стержни (*2*). Это активная зона. Наружная часть (отражатель) из графитовых брусков без отверстий (*3*). Через центр активной зоны проходит вертикальный канал, в который опущен регулирующий стержень (*4*). Рядом с ним еще два канала для стержней аварийной защиты (*5*). Реактор окружен толстой бетонной стеной (*6*) для защиты людей от излучения.

Для уменьшения утечки нейтронов из активной зоны ее окружают отражателем, сделанным из материалов, пригодных в качестве замедлителя. За счет отражателя критические размеры активной зоны несколько уменьшаются. Критические размеры зоны зависят от физических свойств материалов. Так, в уран-графитовом реакторе с естественным ураном критический радиус шарообразной активной зоны равен приблизительно 3 м, а критическая масса загрузки составляет примерно 50 т урана.

Современная техника позволяет искусственно обогащать уран изотопом-235. Содержание этого изотопа в обогащенном уране может быть доведено до 93%. А применяя обогащенный уран, можно строить реакторы очень маленьких размеров и использовать в качестве замедлителя и отражателя обыкновенную воду. Используя уран высокого обогащения, в котором мало поглощающего изотопа-238, можно создавать гомогенные реакторы-малютки, в которых критический диаметр шарообразной активной зоны всего 23 см, а критическая масса 0,8 кг. Наконец, уран высокого обогащения позволяет строить реакторы без замедлителя, пользуясь тем, что ядра урана-235 делятся и под действием быстрых нейтронов, хотя и менее охотно. Правда, минимальная критическая масса активной зоны из чистого урана-235 не получается меньше 22 кг.

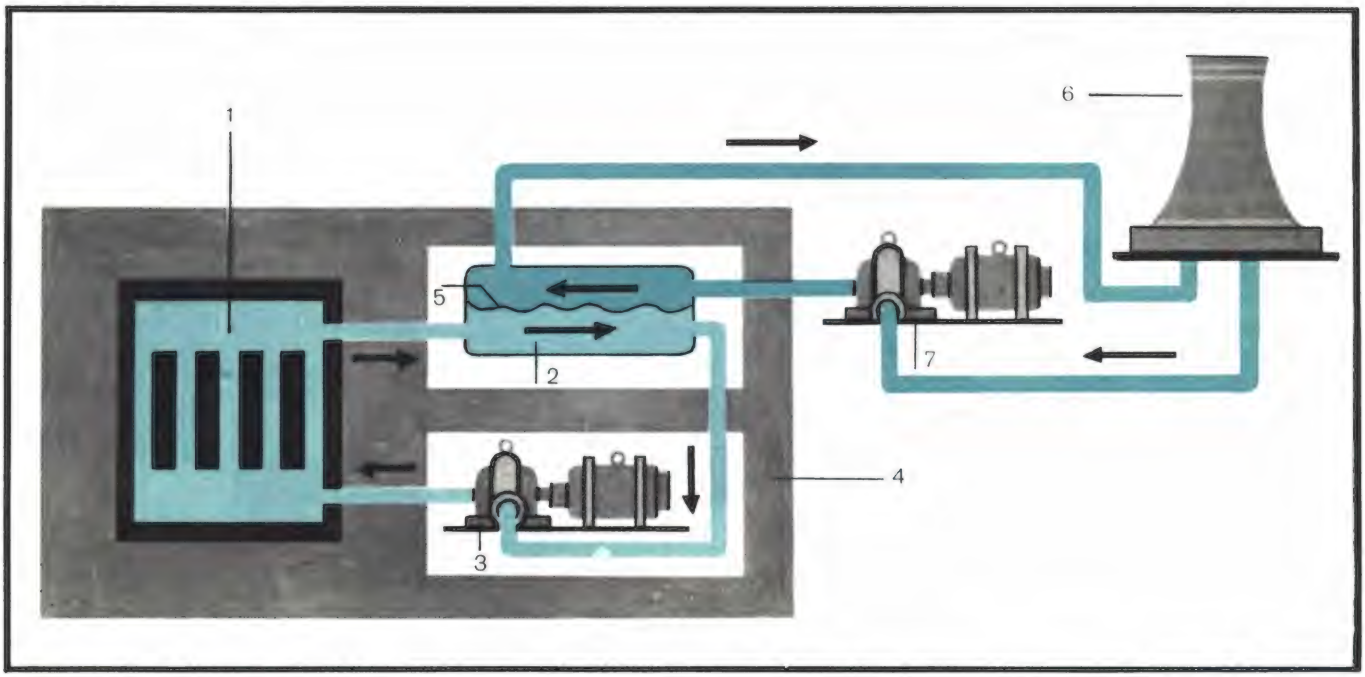
Как избежать взрыва

В активной зоне, загруженной достаточным количеством урана, осуществляется цепная реакция деления ядер урана. Чтобы управлять ею, используют стержни или пластины из материалов, сильно поглощающих тепловые нейтроны. Чаще всего применяют бор (обычно в виде карбида бора или бористой стали) и кадмий.

Для таких стержней (или пластин) делаются отверстия, пронизывающие активную зону. Стержни, введенные в активную зону, поглощают большую часть нейтронов, появившихся в результате деления урана, и цепная реакция не развивается. По мере выдвижения их из реактора все больше и больше нейтронов принимает участие в делении ядер урана, пока, наконец, их не окажется столько, что возникает цепная саморазвивающаяся реакция. С этого момента количество нейтронов в реакторе начинает непрерывно увеличиваться, даже если стержни остаются неподвижными.

А чтобы прекратить развитие цепной реакции, стержни вводят в активную зону. Можно подобрать такое положение стержней (положение компенсации), при котором количество нейтронов в реакторе

Схема охлаждения экспериментального реактора. Теплоноситель (вода) прокачивается через реактор (*1*), идет в теплообменник (*2*) и, охлажденный, возвращается в реактор насосом первого контура (*3*). Для защиты от излучения реактор, теплообменник и насос находятся в помещениях (боксах) с толстыми стенами (*4*). Тепло от воды первого контура отводится водой, циркулирующей во втором контуре и омывающей поверхность теплообмена (*5*). Вода охлаждается в градирне (*6*) и насосом (*7*) возвращается в теплообменник.



будет оставаться постоянным. Это означает, что реактор работает с постоянной мощностью.

Это получается, когда в результате каждого деления ядра урана возникает (в среднем) только одно последующее деление, т. е. из числа нейтронов, вылетающих при каждом делении ядра урана, в поддержании цепной реакции участвует только один нейтрон, остальные нейтроны поглощаются.

Почему же удается управлять цепной реакцией, несмотря на то что процесс деления идет быстро? Ведь обычно в таких случаях реакции протекают со скоростью взрыва. К счастью, не все нейтроны, образующиеся при делении ядер урана, вылетают одновременно. Часть их (0,7 %) освобождается с небольшим запозданием. Эти нейтроны называются *запаздывающими*, среднее время запоздания — 10 с.

Благодаря запаздывающим нейтронам удается осуществить управление цепной реакцией в реакторе. При регулировании реактора исходят из такого положения: в каждом последующем акте деления увеличение количества нейтронов не должно превышать доли запаздывающих нейтронов. Требуется большая осторожность при выдвижении поглощающих стержней из активной зоны. Ошибка — и цепная реакция становится неуправляемой. Поэтому очень важно точно следить за размножением нейтронов в активной зоне реактора, т. е. измерять нейтронные потоки в активной зоне. Помогают в этом измерительные комплексы или установки, состоящие из чувствительных детекторов (датчиков) и электронной регистрирующей аппаратуры.

Как же начинается цепная реакция? Как в реакторе появляется первый нейтрон — родоначальник нейтронов, которые вылетают из делящихся ядер? В реакторах, использующих природный или слабообогащенный уран, первые свободные нейтроны дает сама природа: ядра урана способны самопроизвольно (спонтанно) делиться и испускать при этом нейтроны. Случаи спонтанного деления очень редки, но, так как в реакторе собирается большое количество урана, одиночные деления происходят довольно часто и небольшое количество нейтронов постоянно блуждает в активной зоне. Для запуска реакторов, использующих обогащенный уран, в активную зону вводят маленькие ампулы с радиоактивными препаратами, излучающими нейтроны.

Защита от излучений

Итак, мы знаем, как осуществить цепную реакцию и как управлять ею. Знаем, что для этого нужна активная зона, загруженная необходимой массой урана, нужны стержни регулирования и приборы, с

помощью которых можно измерять потоки нейтронов.

Достаточно ли этого, чтобы пустить простейший реактор? Нет. Еще не соблюдены требования безопасности людей. Ведь во время цепной реакции часть нейтронов вылетает из активной зоны, даже окруженной отражателем. Кроме того, деление ядер урана сопровождается сильным γ-излучением. А потоки нейтронов и γ-излучение губительно действуют на человеческий организм. Поэтому активную зону реактора надо со всех сторон оградить стеной биологической защиты, ослабляющей излучение до такой степени, чтобы человек мог находиться вблизи работающего реактора. Биологическая защита реактора — это массивное сооружение, сделанное из бетона толщиной более 2 м. В некоторых случаях для биологической защиты используют обыкновенную воду, а иногда сочетание стали с водой или бетоном.

Но это еще не всё. Для безопасности, на случай ошибок в управлении реактором или возникновения в реакторе или в связанном с ним оборудовании неисправностей, необходима аварийная защита, которая с помощью специальных устройств быстро вводит в активную зону стержни. Они поглощают нейтроны — цепная реакция автоматически прекращается.

В помещениях, где работают люди, обслуживающие реактор, интенсивность излучения измеряется установленными здесь стационарными дозиметрами. Кроме того, каждый работающий имеет индивидуальный миниатюрный дозиметр, который называется электроскопом. Он регистрирует полученную дозу облучения.

Что же происходит в реакторе?

Мы уже знаем, что ядерным горючим служит уран. В реакторе ядра урана делятся, образуя при каждом делении по два осколка приблизительно равной величины.

Таким образом, из одного ядра урана образуются ядра двух элементов, находящихся в средней части таблицы Менделеева. Образующиеся в результате деления ядра радиоактивны.

Реакция деления ядер урана сопровождается выделением огромного количества кинетической энергии, причем основная доля, порядка 80%, приходится на кинетическую энергию осколков деления. По закону сохранения энергии кинетическая энергия осколков при их торможении от столкновения с другими ядрами превращается в тепловую и нагревает уран, который необходимо охладить, т. е. отвести от него тепло и использовать это тепло наивыгоднейшим образом.

Для отведения тепла от урана используются различные жидкие или газообразные вещества, называемые *теплоносителями*. В качестве теплоносителей применяют воду, различные газы, жидкие металлы и органические соединения. Практически уран загружается в реактор в виде так называемых ТВЭЛов — тепловыделяющих элементов, сделанных чаще всего из двуокиси урана; одеты они в герметические оболочки, которые предохраняют горючее от коррозионного и механического воздействия теплоносителя и препятствуют выходу некоторых продуктов деления, а следовательно, уменьшают радиоактивность теплоносителя. Очевидно, теплоносители должны содержать как можно меньше химических элементов, поглощающих нейтроны, и не вызывать разрушительной коррозии оболочки ТВЭЛов и металлоконструкций, с которыми соприкасается теплоноситель.

Кроме того, теплоносители должны мало активироваться, т. е. почти не приобретать искусственной радиоактивности под воздействием нейтронов, и не разлагаться под воздействием радиоактивных излучений. И конечно, теплоносители должны иметь достаточную теплоемкость, чтобы эффективно отводить тепло.

Чаще всего охлаждение реакторов производится по замкнутому циклу. Нагретый теплоноситель из реактора поступает в теплообменники, где охлаждается, а затем циркуляционными насосами снова возвращается в реактор. Эту систему называют *первым контуром охлаждения* реактора. Теплоноситель в нем обязательно радиоактивен, особенно во время работы реактора. Поэтому первый контур делается герметичным и окружается биологической защитой.

Теплоноситель, отбирающий тепло у теплообменников первого контура и протекающий по *второму контуру охлаждения*, отделен от первого контура и в смысле радиоактивности не опасен для людей.

Тепловыделяющие элементы безопасны до загрузки в реактор, так как естественная радиоактивность урана ничтожна.

В процессе работы, благодаря накоплению осколков деления урана, являющихся источниками мощного γ-излучения, у ТВЭЛов появляется очень высокая радиоактивность, сравнимая с активностью де-

Водо-водяной исследовательский реактор типа ВВР-С.

Петлевой материаловедческий реактор (МР), работающий в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в Москве. Мощность этого реактора 40 МВт, а общая мощность установленных в нем петлевых каналов достигает 10 МВт.

сятков килограммов радия. Поэтому выгрузка из реактора отработанных ТВЭЛов ведется дистанционно, с помощью специальных механизмов, за толстой защитой, предохраняющей от губительного γ-излучения.

В некоторых реакторах, где защитой служит вода, радиоактивные ТВЭЛы находятся в глубине бассейна, заполненного водой. Вода защищает от излучения и позволяет видеть перегружаемые тепловыделяющие элементы.

Мощное нейтронное излучение реакторов делает находящиеся в них вещества и материалы радиоактивными. Поэтому для работы с предметами, побывавшими в реакторе, тоже применяется дистанционная техника: «механические руки» и другие специальные манипуляторы.

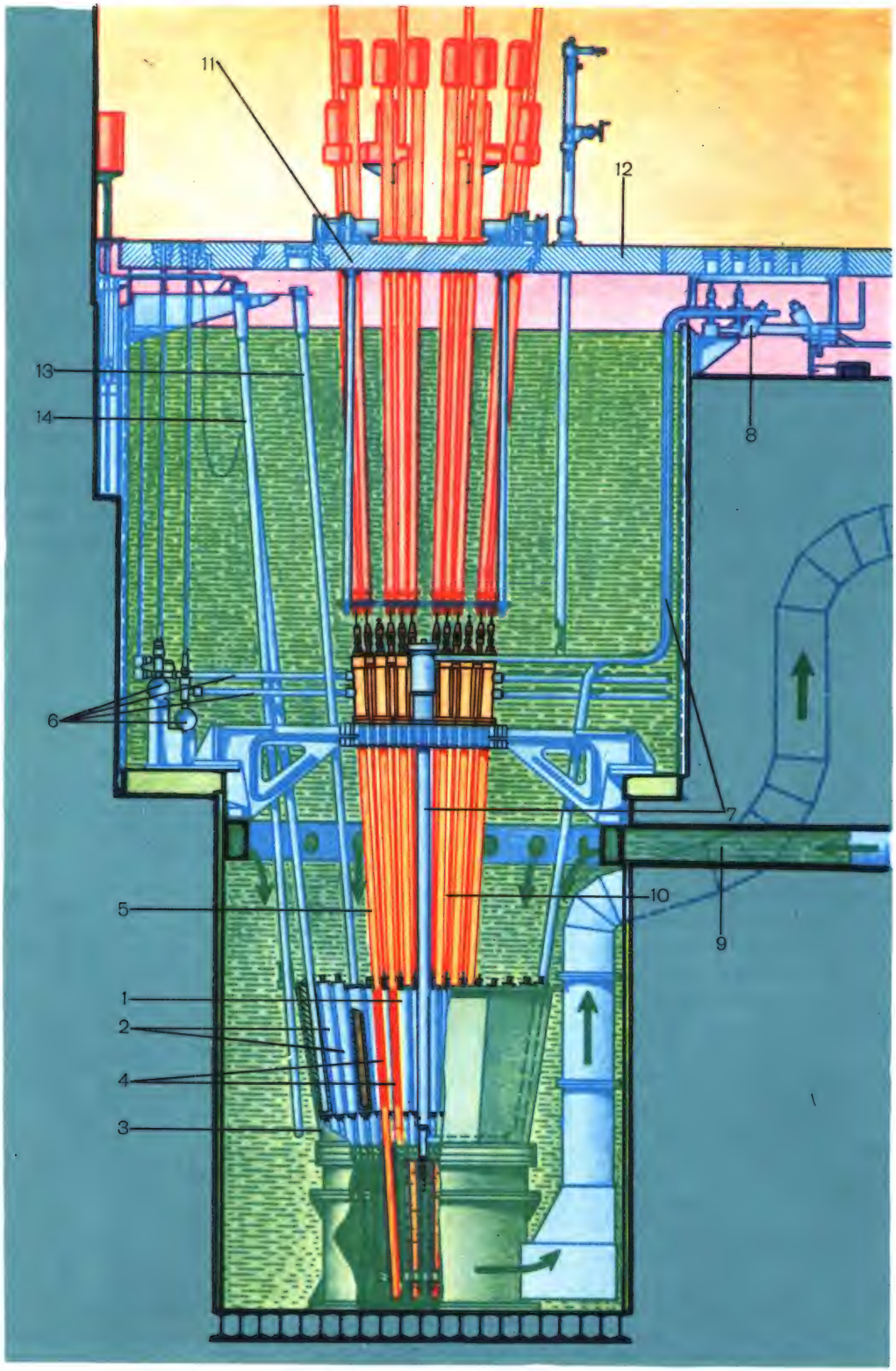
Под действием нейтронного излучения реактора все материалы меняют свои механические свойства, а некоторые из них форму и размеры. Перед проектированием реакторов надо хорошо изучить поведение материалов в нейтронном поле. Этим занимается специальная отрасль науки — радиационное материаловедение.

Заготовка топлива

Захват нейтронов ядрами урана-238 затрудняет ход цепной ядерной реакции деления урана. Однако при этом происходят чудесные превращения. Захватив нейтрон, ядра урана-238 превращаются в ядра нового вещества — нептуния-239 (элемент № 93), который, в свою очередь, за счет β-распада превращается в плутоний-239 (элемент № 94). А это ядро способно делиться под воздействием нейтронов, так же как и ядро урана-235.

При работе реактора в уране накапливается плутоний, который можно выделить и использовать в реакторах для получения энергии. Получается «печка», где из горящих «дров» сами собой вырабатываются новые отличные «дрова». Переработка урана-238 в плутоний значительно расширила для человечества запасы ядерного горючего.

Вертикальный разрез петлевого материаловедческого реактора (МР). Реактор находится в глубоком бассейне, заполненном водой. Он имеет бериллиевый замедлитель (*1*) и графитовый отражатель (*2*), которые собраны в корпусе (*3*), открытом сверху. Топливные элементы (*4*) установлены в рабочие каналы (*5*). Вода, охлаждающая топливные элементы (ТВЭЛы), подводится к каждому каналу и отводится от него по трубам (*6*) и с водой бассейна не смешивается. Петлевые каналы (*7*) изготовлены вместе с трубами, по которым к ним подводится и отводится теплоноситель, и подсоединяются к контурам петель за пределами бассейна специальными разъемами (*8*). Замедлитель и отражатель охлаждаются водой бассейна, которая отсасывается из нижней части корпуса реактора и после охлаждения в теплообменнике возвращается в бассейн по трубе (*9*). Стержни регулирования и аварийная защита двигаются в каналах (*10*), расположенных между рабочими каналами. Их приводы смонтированы на подвижной платформе (*11*). Если реактор остановлен, подвижную платформу можно откатить в сторону и получить свободный доступ к реактору сверху для перегрузок под защитным слоем воды. Во время работы реактора бассейн закрыт стальными плитами (*12*) для защиты от гамма-излучения, проникающего через толщу воды. Для облучения материалов тепловыми нейтронами вблизи активной зоны смонтированы экспериментальные каналы (*13*), доступные для загрузки аппарата на ходу. На краю отражателя и снаружи, около корпуса реактора находятся каналы (*14*) с ионизационными камерами для системы управления и защиты реактора.



Новое топливо, образовавшееся в реакторе, называется *вторичным ядерным горючим*. Очень важно при этом, в каком количестве образуется вторичное горючее. Количество ядерного горючего, образующегося в реакторах, использующих тепловые нейтроны, почти во всех случаях меньше первоначально загружаемого в реактор. Однако существуют специальные реакторы, использующие быстрые нейтроны. Замедлитель в них отсутствует. В реакторах на быстрых нейтронах вторичного горючего образуется, как правило, больше первоначально загружаемого.

Мы сравнили атомный реактор с печкой, в которой сжигается ядерное горючее для получения тепла. Но строго говоря, это сравнение не точно: атомное горючее, загруженное в реактор, не может быть использовано полностью. Если это и печка, то дрова в ней не могут сгореть до конца, полностью, так как для поддержания цепной реакции необходимая загрузка реактора должна быть не ниже критической.

Разумеется, «несгоревшее» ядерное горючее, содержащееся в ТВЭЛах, извлекается в результате химической переработки и снова идет в дело.

Внимание — эксперимент!

Уровень развития теории реакторов и накопленные экспериментальные данные позволяют проектировать атомные энергетические установки. Однако основные физические характеристики активной зоны реактора, в частности величина критической загрузки, очень чувствительны к незначительным изменениям конструкции. Поэтому при создании каждого нового реактора требуется экспериментальная отработка его активной зоны с помощью физической модели (критической сборки).

На критической сборке воспроизводится в натуральную величину активная зона нового реактора и исследуются ее основные физические характеристики. Зона собирается в открытом резервуаре или на площадке с легкой защитой, рассчитанной на работу при малой мощности (несколько десятков ватт). Конструкция физической сборки делается без системы отвода тепла, чтобы можно было легко изменять зону в ходе опытов.

Эксперименты на критических сборках — увлекательная работа для физиков. Однако, в связи с большой опасностью, она требует особого внимания и собранности экспериментаторов и доверяется только квалифицированным, опытным физикам.

Исследователям, работающим в области ядерной физики, требуются мощные пучки тепловых нейтронов. Для получения таких пучков используются обычно водо-водяные исследовательские реакторы.

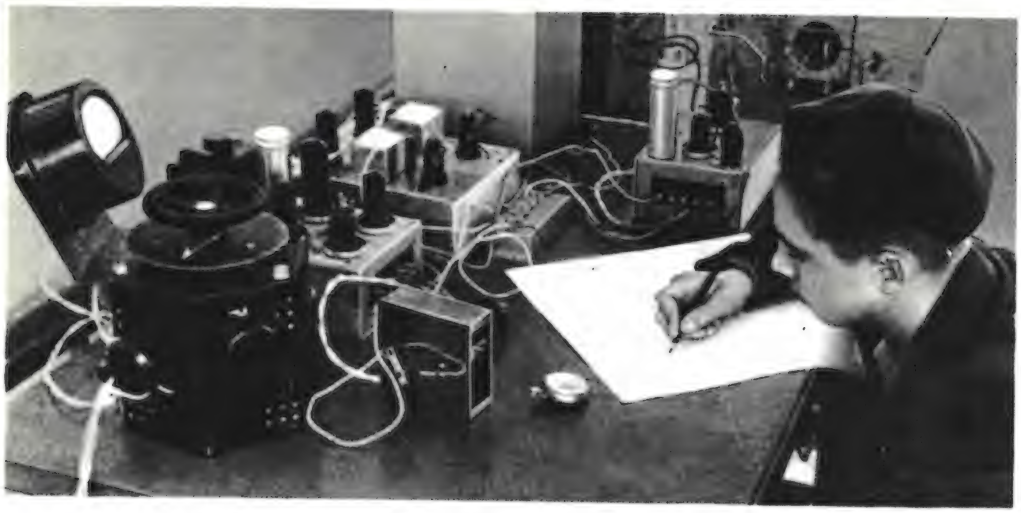
Для успешной работы реактора нужны надежные ТВЭЛы, содержащие уран. Поэтому, прежде чем начать массовый выпуск ТВЭЛов для реакторов, первые образцы их испытываются на исследовательских реакторах, оборудованных специальными устройствами — так называемыми петлями.

Экспериментальная петля, на которой отрабатываются ТВЭЛы активной зоны будущей атомной электростанции, имеет автономную систему охлаждения, где давление и температура теплоносителя такие же, как на настоящей станции.

Одновременно с ТВЭЛами на исследовательских реакторах обычно испытываются и конструкционные материалы, применяемые в реакторостроении. При исследовательских реакторах строятся так называемые горячие материаловедческие лаборатории, имеющие специальную защиту от излучения.

Игорь Васильевич Курчатов (1903—1960)

Советский физик, академик, трижды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР. Свою научную деятельность начал с исследования электрических свойств кристаллов сегнетовой соли, создал основы учения о сегнетоэлектричестве. Принадлежит к числу крупнейших ученых-физиков XX в., работающих по использованию внутриатомной энергии. С 1933 г. занимался ядерной физикой, в частности обнаружил явление ядерной изомерии у искусственно-радиоактивных изотопов, изучал резонансное поглощение нейтронов и их взаимодействие с водородом, исследовал деление тяжелых ядер. Курчатов был выдающимся организатором. Под его научным руководством и при непосредственном участии в нашей стране создана мощная атомная техника, развиты работы по управляемым термоядерным реакциям. На сессии Верховного Совета СССР 15 мая 1960 г. Игорь Васильевич сказал: «Я счастлив, что родился в России и посвятил свою жизнь атомной науке великой Страны Советов. Я глубоко верю и твердо знаю, что наш народ, наше правительство только благу человечества отдадут достижения этой науки».



Юный лаборант Алеша Кондратьев — Кузьмич — за работой. Снимок 1946 г.

Наш первый реактор

Мне посчастливилось работать под непосредственным руководством Игоря Васильевича Курчатова и участвовать в работах по созданию первого советского атомного реактора в самый напряженный период работы, начиная с 1945 г.

Однако рассказ о создании реактора нужно начинать с 1939 г., когда после получения известия об открытии деления ядер урана нейтронами И. В. Курчатов в Ленинграде начал исследования, связанные с делением урана. По его инициативе в Академии наук была создана комиссия по урановой проблеме.

В ноябре 1940 г. на Всесоюзном совещании по физике атомного ядра в Москве Курчатов показал, что овладение энергией ядерных сил возможно, хотя и сопряжено с огромными трудностями и требует затраты очень больших средств. Это было последнее перед войной обсуждение работ по делению урана.

К тому времени в Европе началась вторая мировая война. По инициативе группы физиков, эмигрировавших в Америку, все публикации результатов исследований в области ядерной физики в американских научных журналах были прекращены, так как стала ясна возможность военного применения цепной реакции. Ученые боялись, что гитлеровская Германия сможет первой создать атомную бомбу и с помощью атомного оружия победить в войне.

Советские физики тоже предполагали возможность создания атомного оружия и предложили Советскому правительству план развития ядерных исследований. Однако после нападения фашистской Германии на Советский Союз объем работ по ядерной физике значительно сократился.

В конце 1942 г. И. В. Курчатову было поручено организовать и возглавить все работы по созданию атомной бомбы. Чтобы получить плутоний, необходимый для этой цели, требовались атомные реакторы.

Лаборатории, в которых до войны велись ядерные исследования, находились в осажденном Ленинграде и оккупированном Харькове. Из Ленинграда удалось вывезти небольшое количество приборов и аппаратуры и немного закись-окиси урана. Пришлось заново создавать лаборатории в пустующих помещениях институтов Академии наук, эвакуированных из Москвы, по одному разыскивать физиков-ядерщиков.

При проведении экспериментов нужны были помощники-лаборанты, но люди, имевшие опыт, воевали на фронтах. На помощь пришли совсем юные школьники. Первым был Алеша Кондратьев. Старательного, очень внимательного мальчика скоро стали звать уважительно Кузьмич. Позднее ему, квалифицированному лаборанту, довелось участвовать в пуске первого реактора.

Для реактора нужны прежде всего уран и графит. Пока металлурги искали и осваивали способы производства металлического урана, физики начали исследования поглощения нейтронов графитом. Эти опыты нельзя было проводить на маленьких образцах. Требовались массивные графитовые призмы с размерами в несколько кубических метров, сложенные из хорошо подогнанных друг к другу брусков графита.

Но когда долгожданный, считавшийся чистым графит, наконец, нашли и привезли в лабораторию, оказалось, что он совершенно непригоден, так как сильно поглощает нейтроны.

Началась упорная борьба за получение графита нужной чистоты. Пришлось коренным образом перестраивать технологию производства графита, налаживать контроль его чистоты на заводах. Много дней и ночей просидели за приборами физики и лаборанты, измеряя прохождение нейтронов через графит, пока не убедились в том, что графит получается нужного качества. Другая группа физиков про-

В этой палатке круглые сутки, в холод и зной вели исследования графита и наблюдали прохождение нейтронов через уран-графитовые «решетки».

водила опыты для уточнения процессов резонансного захвата нейтронов при замедлении их парафином — средой, содержащей водород и углерод. В ходе опытов была проверена и блестяще подтверждена идея целесообразности размещения урана в замедлителе в виде отдельных блоков, удаленных друг от друга на некоторое расстояние,— идея создания *гетерогенной размножающей системы.*

Тем временем на тогдашней окраине Москвы, на западном краю огромного Ходынского поля (бывшего полигона), в распоряжение Курчатова была передана территория с несколькими недостроенными зданиями. На ней и началось строительство лаборатории будущего Института атомной энергии. Спешно достроили трехэтажное здание. В его центральной части разместились лаборатории, а в крыльях — квартиры физиков, в том числе и самого Курчатова.

Рядом со зданием разбили большую армейскую палатку, такую, в каких размещаются полевые госпитали. В этой палатке были продолжены опыты с графитом.

Вскоре металлурги начали поставлять уран. Сначала порошок, потом научились делать отливки и вытачивать из них цилиндрические блочки. Начались исследования размножения нейтронов в уран-графитовых «решетках». Это название возникло в связи с тем, что расположение блочков урана в графите подобно расположению узлов, связывающих прутья старинных решеток. В графитовых брусках на равных расстояниях сверлили отверстия. В них закладывали урановые блочки. Из брусков с ураном складывались большие призмы, в которых оставляли гнезда для ампулы с радиевым препаратом (источником нейтронов) и ионизационной камеры. Начинались долгие, утомительные измерения. В тишине раздавались редкие щелчки счетчика, отсчитывающего каждый импульс тока, каждый нейтрон, прошедший через ионизационную камеру. Они звучали то чаще, то реже, повинуясь законам случайного распределения, и нужно было «набирать» большое количество зарегистрированных импульсов, чтобы сделать вывод о характерных свойствах собранной «решетки». Да еще нужно было умело отличать и отбрасывать ложные импульсы, создаваемые помехами.

Измерения шли непрерывно, круглосуточно, работали без выходных дней, хотелось скорее получить результат. Много труда и выдумки потребовалось от физиков, чтобы научиться с помощью измерения в призмах быстро определять чистоту поступающего урана. И не один раз они испытывали огорчение, обнаружив, что очередная партия урана оказалась хуже предыдущей. Тогда поднималась тревога, и металлурги снова и снова меняли технологический процесс получения урана, чтобы уменьшить содержание вредных примесей.

Под строгим контролем продолжали держать графит, который начал поступать регулярно. Измерялись свойства каждой привезенной партии. Для хранения графита построили огромный склад, названный условно СК (склад котла), с примыкающей к нему лабораторией. Дальнейшие измерения графита стали проводить в нем.

К этому времени у физиков, проводивших эксперименты, появились новые помощники — большая бригада рабочих-грузчиков. Под наблюдением физиков они много раз собирали и разбирали графитовые призмы для проведения измерений. Раскладывали графит по сортам, в зависимости от того, в какой степени он поглощает нейтроны.

В первые дни не обошлось без недоразумения. Графит — черный, пачкающий материал, а тут требования к чистоте одежды, обуви, рукавиц. Но к этому скоро привыкли и требования строго выполняли.

Так параллельно шло накопление материалов и экспериментальных данных, необходимых для создания реактора. Много «решеток» пришлось измерить, чтобы выбрать наиболее выгодный шаг (расстояние между блочками урана) для будущего реактора. Наконец он был выбран, и теоретики смогли приблизительно оценить его будущие размеры. Можно было уже начинать строить здание для реактора и конструировать реактор.

Конструкторы начали вычерчивать слои кладки реактора из графитовых брусков. Реактор был задуман как цилиндр с закругленным в виде полушария верхом и шарообразной активной зоной. Нужно было придумать, как сложить такое сооружение из графитовых брусков, чтобы оно надежно держалось без посторонних скрепляющих деталей. Да еще так, чтобы блочки урана были расположены в строго определенном порядке. На листах ватмана появлялись рисунки, напоминающие узор паркета.

Физики снова занялись подготовкой приборов и аппаратуры. На этот раз нужно было подготовиться к счету нейтронов от единиц в минуту до миллионов в секунду. Нужно было сделать ионизационные камеры, в которых под действием нейтронов возни-

Идет сборка первого советского уран-графитового реактора. Плотно друг к другу укладываются бруски графита с отверстиями для урановых стержней. В центре с самых нижних слоев активной зоны поднимаются вертикальные бруски графита с отверстиями — каналами для регулирующего и аварийных стержней (*1*). В них вставлены стержни-поглотители (*2*). Из динамика (*3*) слышатся громкие, но редкие щелчки счетчиков нейтронов. *На снимке:* реактор выложен только до половины.

кали не единичные импульсы тока, а устойчивый электрический ток, по величине пропорциональный потоку нейтронов.

Нужно было побеспокоиться и о безопасности людей, которые будут работать с реактором,— создать приборы для измерения доз губительного излучения — дозиметры, которые ранее не существовали.

Тем временем здание для реактора было построено. В одном конце здания был сделан большой бетонированный котлован, открытый сверху, в котором мог поместиться куб с гранью 10 м. В нем должны были собирать реактор. В другом конце, тоже под землей, построили помещение для лаборатории. В нем смонтировали пульт управления и аппаратуру для контроля за размножением нейтронов. Лаборатория соединялась с котлованом реактора подземным коридором. Другой подземный коридор позволял выйти из лаборатории в поле, не заходя в здание. Заглубление в землю позволило отказаться от бетонных стен для защиты от излучения.

Работали дружно, слаженно, в удивительной атмосфере радости творчества, которую умел создавать Курчатов. Работали до глубокой ночи, с молодым задором. Ведь старшему из группы едва перевалило за 30 лет. Измерения качества графита и урана, поступавших с заводов, велись по-прежнему круглосуточно.

Наконец, графита накопили столько, что можно было бы начинать складывать реактор. Но урана еще мало. Тогда Игорь Васильевич предложил еще раз проверить качество графита, который проверялся по мере поступления отдельными партиями в призмах, содержащих по 5 т. Как ни тщательно производились измерения, ошибка не исключалась. Для измерения в здании СК сложили из графита громадный куб, в котором было уложено 500 т графита. Двое суток непрерывных измерений, и ликование — ошибки не было, графит чистый, годный для реактора. Правда, потом пришлось этот куб разобрать и снова разложить графит по «полочкам». Было решено из самого чистого графита складывать центральную часть реактора, а из плохого — отражатель.

Урана еще не хватало, и, чтобы не терять времени, Игорь Васильевич решил перед сборкой реактора провести серию опытов с подкритическими сферами — уменьшенными по размеру подобиями реактора.

Эти опыты нужны были для того, чтобы точнее предсказать размеры будущего реактора. Ведь теоретики не гарантировали точности расчетов, и могла быть допущена опасная ошибка.

Кроме того, работа по сборке подкритических сфер была генеральной репетицией, последней проверкой исправности приборов и аппаратуры.

И работа закипела. В ход пошли планшеты с чертежами слоев, заготовленными конструкторами. Засновали машины между складами СК и «монтажными мастерскими», как условно называли здание реактора.

Сначала на дне котлована выложили нижний отражатель — круглое графитовое основание будущего реактора высотой около метра. В центре этого основания сложили первую «сферу», сердцевина которой выкладывалась из графитовых брусков с отверстиями. В отверстия закладывали урановые блочки. Эта сердцевина имела форму правильного шара.

В первой сфере содержалось урана немного больше, чем во время измерений в призмах.

Когда сфера была закончена, рабочих отпустили отдыхать. Через специально оставленное в сфере отверстие в центр ее ввели «щуп» с ионизационной камерой, и в тишине зала раздались едва слышные щелчки механического счетчика, отсчитывающие импульсы, создаваемые нейтронами.

Измерения повторяли много раз и, чтобы быть уверенными в стабильности работы аппаратуры, в

перерывах между измерениями помещали камеру в «стандартный источник» — бочку, заполненную парафином, внутри которой была ампула с радиевым препаратом. Но вот плотность нейтронов в центре сферы точно измерена. Игорь Васильевич сам нанес на заготовленный большой лист миллиметровки первую точку графика, который должен был предсказать, при какой загрузке реактор оживет — достигнет критического состояния.

Наутро сферу разобрали и начали складывать вторую, в которой графита и урана содержалось почти в три раза больше, чем в первой. Но пока это было очень далеко от предсказанной критической массы, и поэтому никаких специальных мер предосторожности для обуздания цепной реакции не предпринимали.

Сфера готова. Снова перерыв для измерений, и на график рукою Курчатова была поставлена вторая точка. С трепетом следили за его рукой окружавшие стол помощники. Было видно, что линия, проходящая через эти точки, стремится вниз, к желанному пересечению с горизонтальной осью графика. Расстояние от начала координат до точки пересечения должно было показать будущую критическую массу. Все знали, что судить о ходе кривой по двум первым точкам нельзя, но каждый мысленно старался представить себе, как она пойдет, угадать заветную точку. Даже привыкшим к бесконечным переборкам графитовых призм рабочим было досадно начинать разборку сферы, красиво сложенной в результате нескольких суток непрерывного, напряженного труда.

Снова кладка. На этот раз на графитовом основании выросло очень внушительное сооружение. Однако результаты измерений встревожили и взволновали всех. Третья точка не легла на желанную прямую, а оказалась гораздо выше. Может быть, ошибка? Графит проверен. Неужели уран? Ведь последнюю партию заложили без контрольной проверки.

Скорее разобрали сферу. После контрольных измерений убедились, что подвел все-таки уран. В нем оказалось гораздо больше примесей, поглощающих нейтроны, чем в полученном раньше. Встревоженные металлурги нашли причину ухудшения качества и устранили ее.

Начали кладку четвертой сферы. В нее предстояло заложить такое количество урана, которое было близко к предсказанному. В центре будущей сферы установили вертикальные бруски графита, просверленные по длине. После выкладки первых же слоев сферы в отверстия брусков установили стержни — поглотители нейтронов — алюминиевые трубы, начиненные кадмием. И до самого конца сборки сферы наращивали вертикальные бруски и привинчивали к стоящим внутри стержням новые звенья с кадмием.

Громадная сфера постепенно заполняла котлован. В нем оставалось не так уж много места. День и ночь сновали машины, подвозившие графит. Не помешали ударившие морозы. Тем, кто грузил графит, в холодном СК было жарко от работы, но они отказывались от подмены.

В здании реактора тепло, и спешки постороннему глазу незаметно. Каждый брусок укладывается точно по чертежу, под надзором придирчивых конструкторов. Но ни одной секунды промедления. Пока складывали сферу, снова и снова проверяли приборы, испытывали систему управления стержнями. Впервые к счетчикам нейтронов подключили громкоговорители, и громкие щелчки, то одиночные, то сериями, стали раздаваться в лаборатории при проверках аппаратуры.

Наконец все готово к измерениям. Осторожно подняты поглощающие стержни. Четвертая точка на графике вселила уверенность, что победа близка. Размеры будущего реактора теперь установлены. И снова разборка и кладка.

Металлического урана пока не хватало, поэтому в крайние гнезда закладывали куски прессованной окиси урана. Опять стержни-поглотители с самого начала в кладке. А когда дошли до середины намеченной высоты, в горизонтальный канал установили ионизационные камеры, и с этой минуты счетчики нейтронов работали непрерывно. В лаборатории раздавались редкие нерегулярные щелчки. Нейтронов мало, да и их жадно пожирают кадмиевые стержни.

Уложили еще несколько слоев. В это время приехал Игорь Васильевич посмотреть, как идут дела. Уговорили его попробовать поднять стержни. Разрешил. Подняли. Щелчки не участились, хотя урана было уложено не намного меньше, чем было в четвертой сфере. Насторожились, но Игорь Васильевич успокоил — рано.

После этого пробовали поднимать стержни несколько раз, делая короткие перерывы в кладке. Щелчки учащались, но не очень сильно. Однако графики, построенные по результатам промежуточных измерений, показывали, что дело идет к концу.

К вечеру 24 декабря закончили кладку 61-го слоя графитовых брусков. Отпустили отдыхать всех рабочих. Начались измерения. Постепенно подняли один стержень, потом осторожно начали поднимать второй. Поднимали, прислушиваясь к учащающимся щелчкам счетчиков, приостанавливая подъем для наблюдения и построения графиков.

Вот уже счетчики трещат, почти захлебываются, послушно реагируют на опускание и поднятие стерж-

ней. Все участники опыта радостно взволнованы. Вот она, цепная реакция! Но... на этот раз реактор не достиг критичности. Цепная реакция не развивалась дальше, хотя и было ясно, что надкритичность очень, очень близка.

В час ночи, усталые, радостные и возбужденные, все разошлись отдыхать.

На следующий день выложили последний, 62-й слой. К двум часам все было кончено. Здание реактора опустело. С Игорем Васильевичем остались только ближайшие помощники по созданию реактора.

Последние проверки. Каждый доложил Игорю Васильевичу о готовности аппаратуры и оборудования.

Наступал ответственный момент. Ведь реактор должен быть надкритичным. Как-то он поведет себя?

Курчатов сам стал управлять реактором. Вот уже первый стержень вверху. Медленно, с остановками поднимается второй. Щелчки в динамиках учащаются, сливаются в сплошной рев. Вспышки индикаторных ламп на счетных установках уже неразличимы. Они светятся ровным светом.

Новые и новые точки ложатся на график. Теперь ясно, что реактор «пошел». Он надкритичен. Наконец, очень медленно сдвинулись с места зайчики гальванометров, подключенных к ионизационным камерам. Их движения все ускорялись... Мелькает мысль: а легко ли будет остановить разбушевавшееся атомное пламя? В этот момент Игорь Васильевич нажал кнопку сброса поглощающих стержней, и рев оборвался. Опять редкие щелчки счетчиков, и только глаза присутствующих, радостные лица и кривые на листах миллиметровки говорили о свершившемся событии.

Первый в Европе и Азии атомный реактор был пущен 25 декабря 1946 г.

Плазма и термоядерный синтез

Человек и энергия

Чтобы нагреть до кипения стакан воды, нужно израсходовать энергию 70 000 Дж. Введем единицу 1 z=10^{21} Дж, или 1 z=1 000 000 000 000 000 000 000 Дж. (Вы не найдете этой единицы в справочниках — мы ввели ее просто для удобства.) 1 z — много это или мало? Много — такого количества энергии достаточно, чтобы нагреть до кипения Аральское море. С начала нашей эры до настоящего времени человечество израсходовало не более 10 z энергии.

Но развитие цивилизации связано с непрерывным ростом потребления энергии. В наши дни мировое потребление энергии составляет около 0,2 z в год и ежегодно увеличивается на 5—6%. Если так будет продолжаться и дальше, то уже через 30—40 лет 1 z в год будет мало. Мы сжигаем различные виды топлива: уголь, нефть, газ, дрова. Методы использования топлива изменились, но источник-то прежний. Уже недалеко то время, когда запасы минерального топлива на Земле будут исчерпаны. Энергия рек, морских приливов и Солнца тоже не сможет удовлетворить растущие потребности человечества.

В последние годы появилась атомная энергетика, основанная на использовании внутриядерной энергии урана и тория. К началу будущего века атомная энергия, вероятно, начнет постепенно вытеснять потребление минерального топлива. Однако запасы урана и тория на Земле тоже ограниченны. Кроме того, их использование связано с некоторыми неприятностями. Одна из них — необходимость захоронения радиоактивных отходов. У уранового реактора есть и еще неприятное свойство — в качестве побочного продукта в нем получается плутоний, сырье для производства атомного оружия, запрещения которого требуют народы всего мира.

От урана к дейтерию

В поисках новых источников энергии обратимся от тяжелых элементов — урана и тория к самым легким веществам — водороду с атомной массой $\approx$1 и его изотопам: дейтерию с атомной массой $\approx$2 и тритию с атомной массой $\approx$3. В отличие от обычного водорода дейтерий и тритий обладают большим запасом избыточной внутриядерной энергии, которая может выделяться при реакциях синтеза. *Реакция синтеза* — это процесс, в котором два ядра, сталкиваясь, образуют новое, более тяжелое ядро. В результате

таких реакций выделяется огромное количество энергии.

Для записи ядерных реакций пользуются символами. Вот некоторые из них:

^1H — ядро водорода — протон;

^2H — ядро дейтерия — дейтрон (состоит из протона и нейтрона);

^3H — ядро трития — тритон (состоит из протона и двух нейтронов);

^3He — ядро изотопа гелия с атомной массой 3;

^4He — ядро изотопа гелия с атомной массой 4;

p — протон, то же, что и ^1H;

n — нейтрон.

Энергию, выделяющуюся при реакциях синтеза, принято выражать в миллионах электронвольт (МэВ):

$$1 \text{ МэВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Электронвольт — это энергия, приобретаемая электроном или другой элементарной частицей с единичным зарядом при прохождении разности потенциалов, равной 1 В.

Теперь с помощью символов можно изобразить два возможных варианта реакции с использованием дейтерия:

$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3He + n + 3{,}3 \text{ МэВ};$$
$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3H + p + 4{,}0 \text{ МэВ}.$$

В реакциях синтеза можно использовать и тритий, и смесь дейтерия с тритием. Но тритий в природе практически не встречается, его изготовляют в урановых реакторах. Запасы же дейтерия в природе огромны. В ведре обычной воды содержится около 1 г тяжелой воды, каждая молекула которой состоит из атома кислорода и двух атомов дейтерия. Если теперь взглянуть на карту Земли с ее морями и океанами, то легко понять, что возможность использования внутриядерной энергии дейтерия позволила бы человечеству раз и навсегда решить энергетическую проблему.

Гелий-III и тритий, получающиеся в результате реакций на дейтерии, также могут вступать в реакцию синтеза с дейтерием, причем с выделением еще больших энергий. С учетом этого продолжим запись двух вариантов реакций на дейтерии, а потом подведем итог, просуммировав каждые два уравнения:

$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3He + n + 3{,}3 \text{ МэВ}$$
$$^2H + {}^3He \rightarrow {}^4He + p + 18{,}3 \text{ МэВ}$$
$$\overline{3\,{}^2H \rightarrow {}^4He + p + n + 21{,}6 \text{ МэВ}}$$

$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3H + p + 4{,}0 \text{ МэВ}$$
$$^2H + {}^3H \rightarrow {}^4He + n + 17{,}6 \text{ МэВ}$$
$$\overline{3\,{}^2H \rightarrow {}^4He + p + n + 21{,}6 \text{ МэВ}}$$

При обоих вариантах реакций мы приходим к одному и тому же результату: дейтерий переходит в гелий, причем процесс этот сопровождается излучением протонов, нейтронов и выделением энергии.

Откуда берется энергия

Согласно знаменитой формуле Эйнштейна $E = mc^2$ масса и энергия взаимосвязаны.

Из трех ядер дейтерия получилось одно ядро гелия-4, протон и нейтрон. Проследим за массой частиц, участвующих в реакциях синтеза. Массу будем измерять в атомных единицах. За атомную единицу массы принята 1/12 массы атома углерода ^{12}C:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

В этих единицах масса ядра дейтерия составляет 2,014. Значит, масса трех ядер дейтерия в левой части окончательного уравнения составляет 6,042. Справа масса протона составляет 1,0073 атомной единицы, нейтрона — 1,0087 и ядра гелия-4 — 4,0027 атомной единицы. Масса всех частиц в правой части уравнения составляет 6,0187. Таким образом, в результате реакции масса уменьшилась на 0,0233 атомной единицы и выделилась энергия в соответствии с формулой Эйнштейна. Всегда общая масса частиц, получившихся в результате реакции синтеза (и реакции деления тоже), меньше, чем масса исходных частиц.

По формуле Эйнштейна, 1 а.е.м. эквивалентна 931,5 МэВ энергии. Значит, в результате реакции выделится энергия $931{,}5 \cdot 0{,}0233 \approx 21{,}6$ МэВ.

Если в 1 г дейтерия все атомы подвергнутся реакциям синтеза, выделится энергии около $3{,}5 \cdot 10^{11}$ Дж (350 ГДж). Для наглядности давайте вспомним о стакане воды, с которого начался наш разговор об энергии. Энергии $3{,}5 \cdot 10^{11}$ Дж (350 ГДж) хватило бы, чтобы нагреть до кипения 5 млн. стаканов воды.

Реакция деления и реакция синтеза

Цепная реакция деления в атомном реакторе идет сама собой и распространяется как эпидемия. Одно ядро делится, из него вылетают нейтроны, которые попадают в другие ядра и вызывают их деление. Пе-

реносчиком этой эпидемии является нейтральная частица — нейтрон. Проникая в ядро, нейтрон вызывает его деление и рождение новых нейтронов. Атомные ядра играют в этом процессе пассивную роль. Они являются мишенями для нейтронной бомбардировки.

Совсем по-иному обстоит дело при реакции синтеза. Она может произойти лишь при сближении ядер дейтерия на очень маленькое расстояние, около 10^{-15} м. Что же препятствует сближению ядер? Каждое атомное ядро — это положительно заряженная частица, а положительно заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Сила отталкивания обратно пропорциональна квадрату расстояния. Когда мы сближаем ядра на очень малое расстояние, отталкивание резко возрастает.

Для того чтобы преодолеть силы отталкивания, ядра дейтерия должны обладать большой скоростью, т. е. большой кинетической энергией. Но что значит большая кинетическая энергия частиц в веществе, что значит быстрое движение частицы? Это значит, что температура вещества должна быть очень высокой. Для получения реакции синтеза необходимо сильно нагреть вещество, поэтому такие реакции называются *термоядерными*.

Главное — температура

При низкой температуре ядра дейтерия движутся слишком медленно и поэтому не могут близко подойти друг к другу, преодолеть электростатическое отталкивание. Начнем повышать температуру. При 10 000 К никаких признаков реакций мы не будем наблюдать. Даже при 100 000 К реакция не начнется. Температура слишком мала, а значит, и скорости частиц малы. Только при температуре около миллиона кельвинов появятся первые признаки реакций. Но для того чтобы энергию термоядерных реакций можно было практически использовать, необходима еще более высокая температура — сотни миллионов кельвинов.

Возможно ли получить такую температуру? Мы знаем, что в водородной бомбе термоядерная реакция происходит. Водородная бомба поджигается обычным атомным зарядом, создающим необходимую температуру, а дальше процесс идет сам собой. Но процесс этот носит характер неуправляемого разрушительного взрыва, энергию которого невозможно использовать в мирных целях. К сожалению, нельзя сделать очень маленькую водородную бомбу, скажем миллиграммовую,— взрыв получался бы слабый и энергию его можно было бы использовать.

Значит, нужно искать другие пути повышения температуры.

Что такое плазма и как ее получить?

Что же происходит с веществом при нагревании? Если поднимать температуру твердого вещества — оно превратится в жидкость. Нагреем жидкость еще сильнее — она испарится и превратится в газ. Эти три состояния вещества всем известны.

При повышении температуры газа появляются признаки совершенно новых явлений. Нейтральные атомы теряют принадлежащие им электроны и превращаются в положительные ионы. Образуется газообразная смесь свободно движущихся положительных ионов, электронов и нейтральных атомов. Это новое состояние вещества называется *плазмой*. Чем выше температура, тем больше ионов и электронов в плазме, тем меньше остается в ней нейтральных атомов. Например, для водорода при температуре выше 10 000 К практически все атомы теряют принадлежащие им электроны и превращаются в ионы. Для разных веществ полная ионизация наступает при различных температурах.

Итак, плазма есть четвертое состояние вещества, соответствующее очень высоким температурам. А так как высокая температура является необходимым условием термоядерных реакций, то легко понять, что в термоядерном реакторе нам придется иметь дело именно с плазмой. Поэтому давайте познакомимся с нею поближе.

Плазма — наиболее распространенное в природе состояние вещества. Солнце и все звезды — это сгустки очень горячей плазмы. Наша Земля окружена плазменной оболочкой — ионосферой. За пределами ионосферы существуют так называемые радиационные пояса — области, где тоже присутствует плазма. Во всем пространстве Солнечной системы дуют создаваемые Солнцем плазменные ветры, иногда достаточно сильные. Когда интенсивность этих плазменных ветров очень велика, они, как и радиационные пояса, представляют серьезную угрозу для космонавтов. В состав солнечных плазменных ветров и радиационных поясов Земли входят быстрые частицы, которые могут разрушать клетки человеческого организма.

На Земле мы встречаемся с плазмой в различных формах электрических разрядов: это электрическая дуга, искра, молния или нарядно окрашенные разряды в разноцветных рекламных трубках.

Для получения плазмы нужно сильно нагреть вещество. Именно благодаря высокой температуре звёзды и Солнце представляют собой практически полностью ионизированную плазму. Но на Земле обычно получают плазму не путем нагрева вещества, а с помощью электрических разрядов. Если поместить в сосуд с газом металлические электроды и создать между ними достаточно высокое напряжение, происходит электрический разряд. В газе всегда присутствует небольшое количество свободных электронов. Под действием приложенного электрического поля они разгоняются и ионизируют нейтральные атомы газа. В результате ионизации высвобождаются новые электроны, которые тоже ускоряются электрическим полем и ионизируют новые атомы. Процесс ионизации разрастается лавинообразно.

Дуговой плазменный разряд можно получить прямо в воздухе. Однако плазму с определенными, нужными нам свойствами мы создаем в герметичных установках. Это позволяет получить плазму необходимого состава, предохранить ее от смешивания с атомами различных газов, из которых состоит воздух.

Физика плазмы

Наука, изучающая плазму, пережила два рождения. Впервые физика плазмы возникла в 20-х годах нашего века. В то время в технике начали применять различные газоразрядные приборы: тиратроны, газотроны, игнитроны и др. Надо было разобраться в процессах, происходящих в этих приборах. Физики сравнительно легко справились с теми первоначальными задачами, которые поставила перед ними практика. Новых задач не возникало, и интерес к плазме пропал. Физика плазмы превратилась в заштатную область науки.

Лишь в послевоенные годы появились новые перспективные идеи, и прежде всего идея *управляемого термоядерного синтеза*, т. е. обуздания термоядерных реакций и использования их энергии для нужд человечества.

Современная физика плазмы представляет собой научную основу для осуществления управляемого синтеза. Все развитие физики плазмы в последние годы было тесно связано с поисками решения именно этой проблемы.

В начале 50-х годов XX в. физикам казалось, что достаточно выдвинуть идею, которая была бы принципиально правильной,— и уже через несколько лет она будет реализована и найдет практическое применение. Но на этот раз попался очень крепкий орешек. Физики встретились с такими трудностями, что все первоначальные надежды исчезли вскоре после начала экспериментальных исследований.

Работы по управляемому синтезу ведутся в течение многих лет, но до окончательного решения задачи еще далеко.

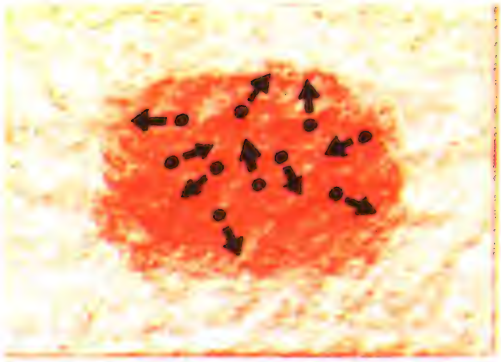
Основные свойства плазмы

Одной из важнейших ее характеристик является *концентрация* заряженных частиц (т. е. число частиц в единице объема), которая может изменяться в очень широких пределах. Например, в ионосфере концентрация составляет около 100 000 ионов и столько же электронов в 1 $см^3$, а в электрической дуге она может составлять 10^{17} или 10^{18} электронов и ионов в 1 $см^3$.

Не менее важной характеристикой плазмы является ее *температура*. Когда мы говорим о температуре воздуха, то мы не можем сказать, что кислород в воздухе более холодный, чем азот. Температура всех составных частей воздуха: азота, кислорода, углекислого газа, водяных паров — одинакова.

Когда мы создаем плазму с помощью электрического разряда, то энергию от источников электрического поля получают прежде всего легкие частицы — электроны. Они ускоряются, а значит и нагреваются, под действием электрических сил. Перераспределение тепла в плазме, как и в газе, происходит за счет столкновений частиц. Значит, электрон может нагреть ион, столкнувшись с ним. Но масса электрона ничтожно мала по сравнению с массой иона. Как легкий шарик пинг-понга при ударе о массивный металлический шар может передать ему лишь небольшую долю энергии, так и электрон, стукнувшись об ион, сможет передать ему очень небольшую долю энергии. Для передачи значительного количества энергии от электронов к ионам должно произойти много столкновений. Только в плазме с очень высокой концентрацией, где число столкновений электронов и ионов очень велико, температура электронов и ионов примерно одинаковая.

Рис. 1. При отсутствии внешних полей частицы плазмы движутся хаотически.



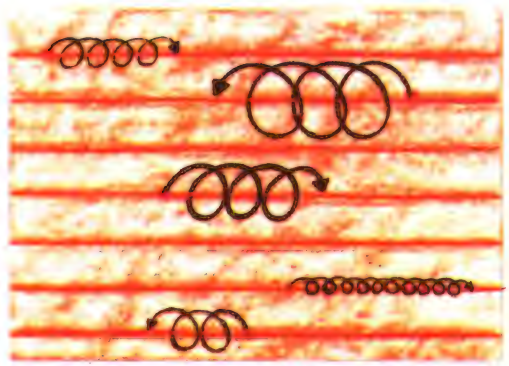


Рис. 2. При наложении магнитного поля заряженные частицы движутся по винтовым траекториям вдоль силовых линий магнитного поля. Направление вращения зависит от знака заряда частицы. Направление поступательного движения частицы зависит от направления ее начальной скорости в момент включения магнитного поля.

Что произойдет, если поместить плазму в электрическое поле? Под действием поля положительные ионы начнут двигаться вдоль силовых линий поля, а электроны пойдут им навстречу. Значит, через плазму пойдет электрический ток. Плазма представляет собой *проводник электрического тока*, и очень своеобразный проводник. Проводимость металлической проволоки уменьшается при нагревании проволоки, а проводимость плазмы, наоборот, растет с ростом температуры. При температуре 15 000 000 К водородная плазма проводит ток лучше, чем медь и серебро при комнатной температуре.

Плазма не только обладает хорошей электрической проводимостью, но является также очень хорошим проводником тепла. Если нагреть какой-то участок плазмы до очень высокой температуры, то тепло мгновенно распространится из этого участка во все стороны. Из-за хорошей теплопроводности тепло очень легко уходит из плазмы, поэтому ее трудно нагреть. В обычных условиях плазма требует для своего существования непрерывного подвода энергии со стороны. Если не подводить энергию, то электроны и ионы быстро отдадут ее стенкам сосуда, в котором создали плазму. Температура плазмы понизится, и электроны и ионы начнут объединяться, превращаясь в нейтральные атомы.

Существуют методы выделения газов из газовой смеси. Например, можно отделить кислород от азота. Но разделить электроны и ионы плазмы нам не удалось бы. Если мысленно убрать электроны из плазмы, то излишек ионов образует сильный положительный заряд, который притянет электроны обратно. Поэтому количество электронов и ионов в плазме примерно одинаково и плазма в целом является нейтральной.

Иногда применяют термин *квазинейтральность*, чтобы показать, что нейтральность плазмы кажущаяся. Под действием внешних электрических или магнитных полей плазма ведет себя совсем не так, как нейтральный газ. Эти специфические свойства плазмы резко проявляются в магнитном поле.

Плазма в магнитном поле

Поведение плазмы определяется тем, как движутся составляющие ее частицы. Когда плазма предоставлена самой себе, частицы ее движутся хаотически, примерно так же, как молекулы газа (рис. 1). После включения магнитного поля движения заряженных частиц резко изменяется. Они начинают закручиваться вокруг силовых линий магнитного поля, причем положительные ионы закручиваются в одну сторону, а электроны — в другую. Траектории частиц представляют собой винтовые линии, похожие на пружинку или на нитку, навитую на круглый карандаш. При таком характере движения частицы могут свободно перемещаться только вдоль силовых линий магнитного поля. Поперек поля они уже не могут двигаться, так как каждая пружинка «надета» на соответствующую силовую линию (рис. 2).

К сожалению, нельзя нагреть плазму вместе с установкой, в которой она находится, как мы нагреваем чайник с водой. При температуре, которая необходима, вся установка моментально испарилась бы и тоже превратилась в плазму. При таких температурах вещество может существовать только в виде плазмы. Поэтому стенки установок остаются холодными, и нужно как-то предохранить плазму от взаимодействия с ними, подвесить ее в пространстве так, чтобы она не соприкасалась ни с какими деталями. На помощь приходит магнитное поле.

Если бы мы сумели создать магнитное поле, силовые линии которого со всех сторон окружали бы плазму, то частицы плазмы не смогли бы выбраться из магнитного плена. А значит, и тепло не уходило бы из плазмы — ведь тепло в основном уносится движущимися частицами и передается ими холодным стенкам установки. В этом и заключается идея *магнитной термоизоляции*, лежащая в основе всех исследований по управляемому термоядерному синтезу.

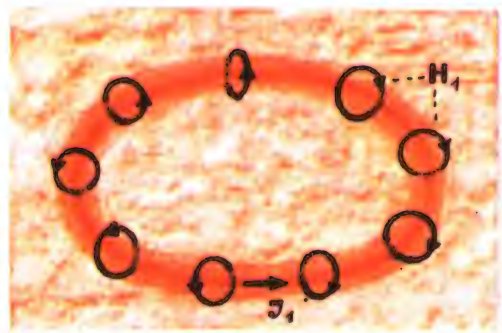
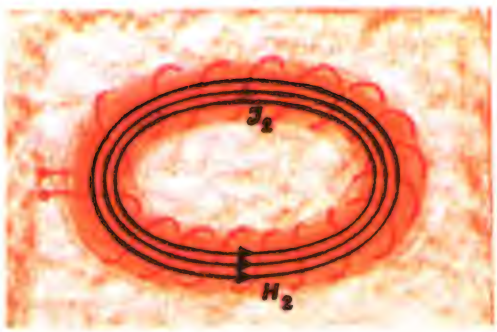


Рис. 3. Тороидальная камера в разрезе и плазменный виток в ней.

Рис. 4. Магнитное поле (H_1) тока (I_1), текущего по плазменному витку.



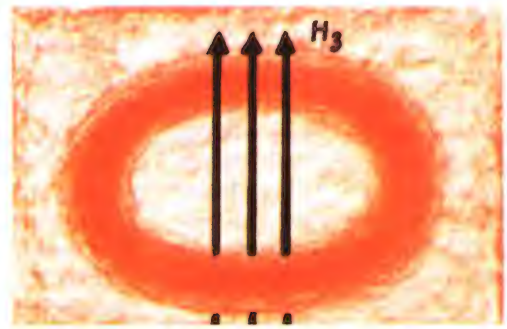


Рис. 5. Катушка с током (I_2), создающая продольное магнитное поле (H_2).

Рис. 6. Силовые линии третьего магнитного поля (H_3), которое служит для фиксации положения плазменного витка.

От идеи — к ее осуществлению

Как реализовать идею магнитного удержания и термоизоляции плазмы? Пропустим через плазму сильный электрический ток. Он будет выполнять сразу три функции. Во-первых, электрический ток, если его пропустить через газ, будет создавать плазму. Ведь ток — это поток электронов, которые и будут ионизировать нейтральные атомы.

Во-вторых, проходя через плазму, ток ее разогревает так же, как он разогревает спираль электроплитки.

В-третьих, ток создает вокруг себя магнитное поле — это самое важное. Когда ток проходит по проводнику, он окружает себя магнитными силовыми линиями. Таким образом, ток создает плазму, нагревает ее и, казалось бы, должен удерживать ее в подвешенном состоянии, предохраняя ее от контакта с холодными стенками установки. Но удержать плазму в магнитном плену не так-то легко.

Простейшей практической конструкцией, позволяющей создать и разогреть плазму, является тороидальная камера, т. е. камера в виде пустотелого бублика (рис. 3). Внутри бублика мы создаем замкнутый плазменный виток, по которому пропускаем ток большой силы (рис. 4). Но оказывается, что проводник с током — система неустойчивая. Электрические силы пытаются деформировать проводник с током. Почему можно пропускать ток через обычные металлические проводники? Потому что металлический проводник обладает жесткостью. Но если пропускать токи большой силы, то даже жесткий металлический проводник начал бы извиваться и вместо прямого проводника получилась бы запутанная змейка.

Плазма — «мягкое» вещество. У нее нет соственной жесткости. Достаточно кольцевому плазменному витку хоть чуточку отклониться от положения равновесия — а причин для этого может быть сколько угодно,— и сразу же виток начнет изгибаться, обязательно стукнется о стенки камеры и отдаст ей свое тепло. Значит, магнитного поля тока, текущего по плазменному витку, недостаточно для обуздания плазмы. Но плазменный виток можно стабилизировать, предохранить от деформаций с помощью добавочного (внешнего) магнитного поля.

Для этого на тороидальную камеру наматывают катушку и пропускают по ней ток. Похожие катушки широко используются для создания магнитного поля в электромагнитах, трансформаторах, динамиках. Катушка создаст в камере продольное магнитное поле, силовые линии которого будут идти вдоль плазменного витка. Это поле сообщит плазменному витку необходимую жесткость, предохранит его от

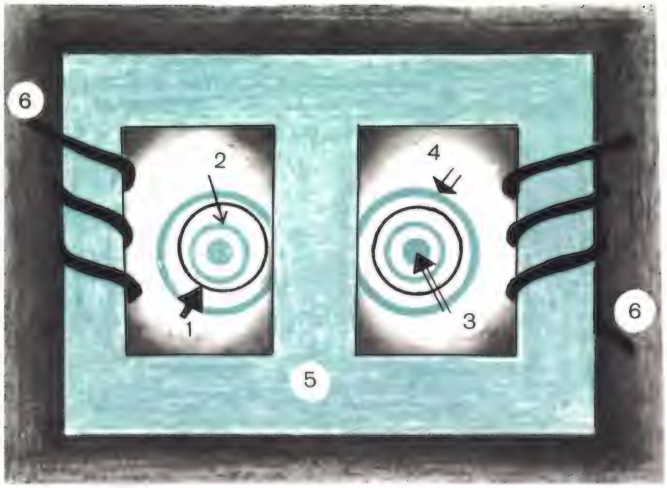


Рис. 7. Установка Токамак (в разрезе).

неустойчивости и от взаимодействия со стенками (рис. 5).

Теперь есть два магнитных поля — магнитное поле тока, текущего по плазме, и продольное поле, создаваемое катушкой, намотанной на поверхность тороидальной камеры. Такая комбинация двух полей представляет собой идеальную ловушку для отдельных заряженных частиц. Но для удержания плазменного витка, состоящего из множества частиц, двух полей снова оказывается недостаточно. Физикам известна закономерность, по которой любая электромагнитная система стремится увеличить свою индуктивность. Поэтому плазменный виток с током стремится растянуться, увеличить свой радиус, так как с увеличением радиуса возрастает и индуктивность витка.

Остается сделать еще один шаг: добавить к двум полям третье слабое магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости плазменного витка (рис. 6). Такое поле, взаимодействуя с витком, может удержать его от расширения. Интересно, что это поле можно создать автоматически, без всяких внешних усилий. Надо окружить плазму толстым слоем хорошего проводника — одеть на бублик второй бублик, побольше, сделанный из толстой меди. Как только плазменный виток попытается отклониться от положения равновесия, в медной оболочке по закону электромагнитной индукции возникнет индукционный ток, текущий в обратном направлении по отношению к току в плазме. Индукционный ток будет отталкивать плазменный виток от стенки камеры. Таким образом, смещение витка вызывает появление противодействующей силы, и виток автоматически удерживается в равновесии вблизи продольной оси тороида.

Итак, функции магнитной термоизоляции распределены между тремя магнитными полями. Поле плазменного тока удерживает плазму в равновесии, сжимая ее в тонкий шнур и не давая частицам плазмы разлететься по всей камере. Продольное поле образует как бы жесткий каркас из силовых линий, обеспечивающий устойчивость кольцевого плазменного шнура, не дающий ему изогнуться, деформироваться. Поле индукционных токов фиксирует положение плазменного шнура относительно стенок камеры. Такая система магнитных полей применяется в исследованиях по программе Токамак.

Токамак

Так называется одна из основных советских программ осуществления управляемого термоядерного синтеза. В физике плазмы принято каждому типу установок давать специальное условное название. Наши установки называются Токамак. Они созданы и работают в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова.

Устройство установки Токамак схематически показано на рисунке 7. Тороидальная камера имеет две оболочки: внешнюю (*1*) — из толстой меди и внутреннюю (*2*) — из тонкой нержавеющей стали. Внутренняя камера (ее называют лайнером) и пространство между нею и медной оболочкой откачиваются высоковакуумными насосами. Перед началом каждой серии опытов лайнер длительно прогревают в вакууме при температуре около 400° С. Таковы требования вакуумной гигиены. Ведь общее количество плазмы в камере невелико — всего около стотысячной доли грамма. А объем камеры велик, поэтому достаточно ничтожного поверхностного слоя примесей на ее стенках — и будет не дейтериевая, а грязная плазма, состоящая из самых разнообразных элементов.

Цифрой *3* обозначен плазменный виток. Продольное магнитное поле создается с помощью катушек *(4)*, надетых на поверхность тороидальной камеры. Для питания катушек служат очень мощные батареи конденсаторов или специальные импульсные генераторы, аналогичные тем, которые применяют на больших ускорителях. Вся тороидальная камера надета на сердечник железного трансформатора *(5)*, который служит для создания тока в плазме. Плазменный виток является здесь вторичной обмоткой трансформатора, а первичная обмотка *(6)* питается также от мощных конденсаторных батарей.

В самой большой установке Т-4, постройка которой закончена в 1971 г. (диаметр тороидальной камеры равен 1,8 м), сила тока в плазменном витке может достигать 300 000 А, а напряженность продольного магнитного поля — 4 МА/м.

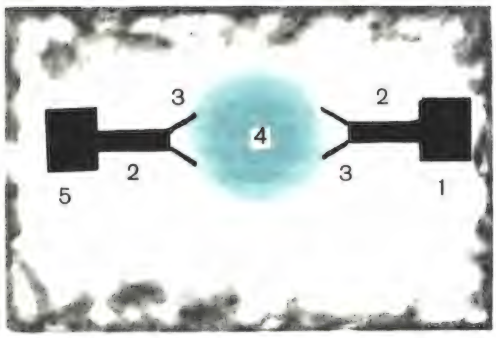


Рис. 8. Для измерения концентрации заряженных частиц в плазме применяют просвечивание плазмы радиоволнами. Скорость распространения радиоволн в плазме зависит от концентрации электронов в ней. Радиоволны длиной 2 мм и 4 мм от генератора высокочастотных колебаний (*1*) распространяются внутри полого металлического волновода (*2*) и через рупор (*3*) выходят наружу в виде направленного луча. Радиолуч проходит через плазменную струю (*4*) и принимается с другой стороны рупором приемного устройства (*5*). В экспериментальных установках плазменная струя просвечивается одновременно множеством радиолучей. Такое многолучевое зондирование плазмы дает очень важные сведения о распределении концентрации заряженных частиц по сечению плазменной струи и об изменении концентрации во времени.

Уже из упоминания о батареях конденсаторов можно понять, что установки Токамак работают в *импульсном режиме*. Колоссальные токи и магнитные поля, создаваемые в тороидальной камере, существуют не непрерывно, а в течение долей секунды. Непрерывное поддержание таких полей и токов потребовало бы огромных затрат энергии.

Оказалось, что установкам Токамак нужна не только вакуумная, но и магнитная гигиена. Требования к качеству магнитного поля, совершенству его геометрии гораздо выше, чем вначале предполагали. Напряженность магнитного поля в системе составляет миллионы ампер на метр, но достаточно, чтобы в систему проникло какое-нибудь посторонее поле всего в сотни ампер на метр,— и равновесие плазменного витка будет нарушено.

Время жизни

Говоря о свойствах плазмы, мы не упомянули об одной из важнейших ее характеристик — времени жизни частиц, или времени жизни энергии в плазме. Нужно было пройти длинный путь от первоначальной формулировки идеи магнитной термоизоляции до создания и тщательного исследования мощных установок Токамак, чтобы убедиться, что и эти системы далеки от совершенства. Даже в описанной выше сложной комбинации магнитных полей частицы не могут существовать как угодно долго. Несмотря на все ухищрения теоретиков и экспериментаторов, термоизоляция плазмы оказывается неидеальной, энергия различными путями утекает из плазмы. Быстрые частицы ускользают из магнитной ловушки и уносят энергию на стенки камеры.

В установках Токамак время жизни частиц составляет сотые доли секунды. В человеческих масштабах это очень маленькое время. Но попробуйте стать на «точку зрения» отдельной частицы в плазменном витке. Каждая частица движется с громадной скоростью, измеряемой тысячами километров в секунду. За время жизни она проходит десятки километров, много раз облетает по всему плазменному витку, прежде чем уйдет из него. Так что с собственных позиций частицы ее время жизни велико. Велико, но недостаточно. Ведь чем дольше живут в плазме быстрые частицы, тем больше вероятность, что за это время они столкнутся с другими частицами и произойдет реакция синтеза. Вероятность столкновения зависит также от концентрации частиц в плазме (рис. 8). Чем больше концентрация частиц, тем больше партнеров встретит на своем пути каждая частица за время жизни. Произведение концентрации на время жизни — это и есть вероятность столкновения. А для того чтобы оно было удачным и произошла реакция синтеза, нужна вдобавок высокая температура. Поэтому фактически основных параметров плазмы у нас два: температура и произведение времени жизни на концентрацию.

Какая часть пути пройдена?

Около двух десятков лет назад физики начали исследования с температуры 10 000 К и дошли до 5 000 000 К, т. е. увеличили температуру в 500 раз. Осталось увеличить ее еще в 30—40 раз, но, может быть, этот участок пути будет гораздо труднее.

Время жизни удалось увеличить в 10 000 раз, но предстоит увеличить его еще в несколько десятков раз, и это не простая задача.

Удалось ли получить на установках Токамак хотя бы первые признаки термоядерной реакции? Да, в 1969 г., при ионной температуре около 5 000 000 К, концентрации $5 \cdot 10^{13}$ частиц в 1 см^3 и времени жизни в несколько сотых долей секунды, наблюдались

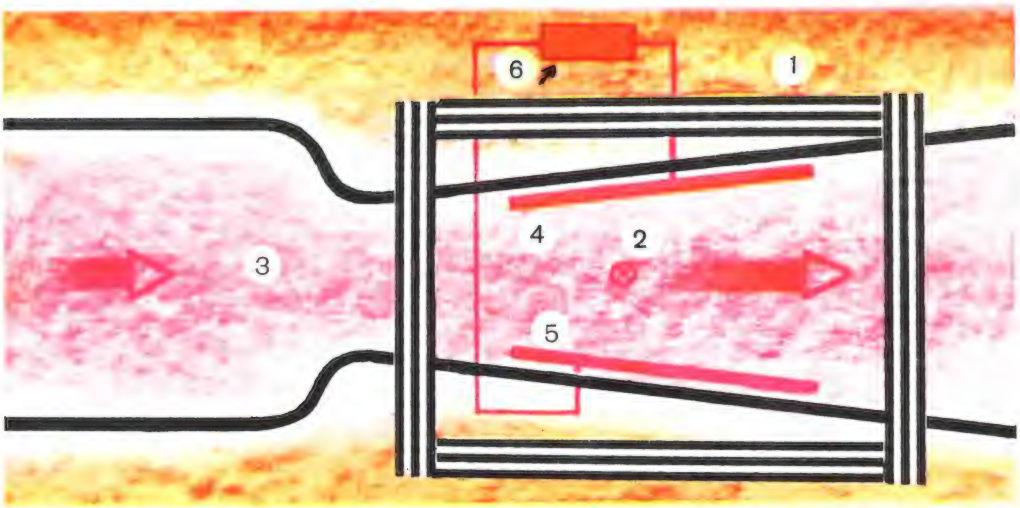


Рис. 9. Схема МГД-генератора. Этот генератор отличается от обычного генератора тем, что вращающаяся обмотка ротора заменена в нем движущейся плазмой. В результате взаимодействия тока плазмы с магнитным полем возникает сила, тормозящая плазму. Чтобы эта сила не остановила движения ионизированного газа, сечение канала делают увеличивающимся от входа к выходу в виде сопла. Расширяясь в сопле, газ приобретает

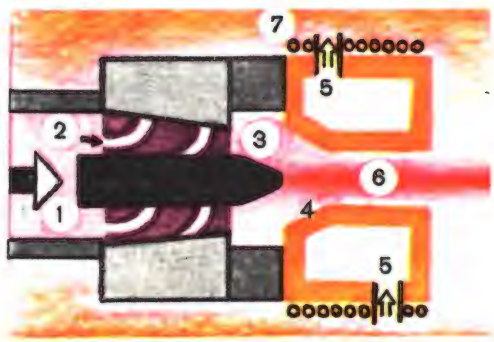
первые признаки термоядерных реакций — нейтронное излучение. Но до окончательного решения проблемы еще далеко. Все существующие установки пока лишь потребляют энергию на разогрев плазмы и создание магнитных полей. Настоящий же термоядерный реактор должен, наоборот, выделять столько энергии, чтобы небольшую ее часть можно было использовать для поддержания процесса, т. е. подогрева плазмы, создания магнитных полей и питания различных вспомогательных приборов и устройств, а основную часть отдавать для потребления в электрическую сеть страны.

Другие пути

Токамак — это только одна из программ на пути к управляемому термоядерному синтезу. Существенным ее достоинством являются простота и высокая симметрия магнитной системы.

Возможны и другие способы удержания плазмы. С помощью катушек можно создать магнитное поле,

«Холодная» плазма



В исследованиях по управляемому термоядерному синтезу изучается высокотемпературная плазма. Ее температура составляет миллионы кельвинов. Плазму, используемую в газоразрядных приборах, дуговых разрядах и некоторых других приборах, называют низкотемпературной или просто «холодной». Пламя свечи или газовой горелки — это тоже «холодная» плазма. Температура «холодной» плазмы — тысячи или десятки тысяч кельвинов. Такая плазма также представляет большой интерес, ее можно использовать в МГД-генераторах, плазменных двигателях, осветительных и других газоразрядных приборах. Интересуются низкотемпературной плазмой и химики. Оказывается, в струе плазмы увеличивается интенсивность многих химических реакций. Например, вводя в струю водородной плазмы метан, можно превратить его в ацетилен. Пары бензина можно разложить на ацетилен, этилен, пропилен и ряд других соединений. Можно связывать азот из воздуха, превращая его в окисные соединения,— это необходимо для получения минеральных удобрений. Эти и многие другие процессы осуществляются в *плазмотронах* — специальных устройствах, в которых газ превращается в плазму с помощью дугового или высокочастотного разряда.

На рисунке изображен дуговой плазмотрон. Плазмообразующий газ (*1*) вначале проходит через систему спиральных каналов (*2*), которые закручивают поток газа, превращают его во вращающийся вихрь. Дуга зажигается между электродом (*3*) и разрядной камерой (*4*). Под действием центробежных сил более тяжелая холодная часть газа отбрасывается к стенкам разрядной камеры охлаждаемой жидкостью (*5*) и защищает их от контакта с горячей плазмой (*6*), т. е. от перегрева. Отжать плазму от стенок камеры помогает магнитное поле, создаваемое соленоидом (*7*). В результате плазма с температурой 5000—10 000 К может создаваться в плазмотронах, изготовленных из обычных, не очень термостойких материалов.

дополнительную кинетическую энергию за счет уменьшения давления. В объеме (*1*) сопла создается магнитное поле. Его силовые линии идут внутри сопла (*2*) перпендикулярно плоскости рисунка. Движение заряженных частиц (*3*) в магнитном поле индуцирует вертикальную силу. Под действием этой силы свободные электроны перемещаются вверх, попадают на анод (*4*) и по внешней электрической цепи переходят к катоду (*5*), обеспечивая питание нагрузки (*6*). Анод и катод нельзя делать сплошными, так как по ним тогда начнут циркулировать большие продольные токи и отдача энергии в нагрузку уменьшится. Поэтому электроды делят на большое количество изолированных друг от друга сегментов. Как всякое новое устройство, МГД-генератор еще должен пройти период разработки и усовершенствования. Но уже сейчас в некоторых случаях он незаменим.

Тепловые и гидроэлектростанции большой мощности строятся очень долго. Получать большие мощности в течение очень короткого времени, составляющего доли секунды, можно с помощью разряда батареи конденсаторов. До сих пор не было генераторов, которые давали бы большие мощности в течение минут или часов, что бывает необходимо в некоторых случаях. Ясно, что никто не станет строить большую электростанцию для того, чтобы она проработала всего несколько минут. Аккумуляторы тоже не годятся — их мощность невелика. Здесь и приходит на помощь МГД-генератор.

напряженность которого увеличивается во все стороны от центральной области, где находится плазма. Заряженные частицы отражаются от областей сильного магнитного поля, такие области действуют на частицы как зеркала, их и называют *магнитными зеркалами*. Плазму можно запереть внутри такого магнитного поля, внутри *магнитной ловушки*. В магнитных ловушках удается получить плазму с очень высокой температурой — до 40 000 000 К, но с относительно небольшими концентрацией и временем жизни. Пока неясно, удастся ли в дальнейшем создать в магнитной ловушке условия, необходимые для осуществления реакции синтеза.

Проводятся также исследования систем с плазменным фокусом. В них плазма ускоряется и сходится (фокусируется) в маленькой области на оси установки, где концентрация и температура достигают очень больших значений, но на очень короткий промежуток времени.

Не исключено, что удастся создавать термоядерную плазму, нагревая вещество с помощью коротких мощных *лазерных импульсов*. Эксперименты в этом направлении уже начаты.

В настоящее время дальше всего продвинулись по пути к управляемому термоядерному синтезу замкнутые тороидальные системы типа Токамак. Для нагрева плазмы в них по плазме пропускают ток большой силы. Но, используя только такой метод нагрева, нельзя достичь необходимых температур в 150—200 млн. К. В дальнейшем для повышения температуры плазмы этот метод, вероятно, будет сочетаться с другими. Для дополнительного нагрева плазмы в установках Токамак можно, например, использовать высокочастотные поля или мощные лазерные импульсы.

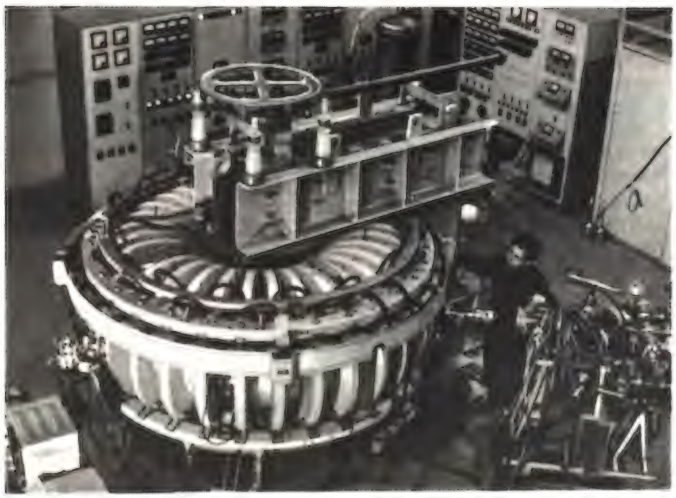
А можно ли в принципе построить термоядерный реактор?

Принципиальных возражений против возможности его создания у физиков нет. Тогда почему мы не начинаем его создание уже сегодня? Вспомните, что еще 50 лет назад К. Э. Циолковский показал принципиальную возможность космических полетов. Однако уровень техники тогда не позволял реализовать эту возможность. То же самое можно сказать о термоядерной проблеме. Необходимые размеры термоядерного реактора и требования к его элементам таковы, что они выходят за рамки сегодняшнего уровня техники. Для реакции на чистом дейтерии плазму нужно разогреть до 200 000 000 К в камере с диаметром около 10 м в магнитном поле напряженностью около 16 МА/м. Само создание таких магнитных полей представляет собой сложнейшую техническую задачу, которую физики в будущем надеются решить с помощью сверхпроводящих обмоток.

Реакцию на смеси дейтерия и трития осуществить легче. Здесь величины температуры и напряженности магнитного поля, размеры камеры могут быть несколько меньше. Поэтому целесообразно сначала попытаться создать реактор, работающий на смеси дейтерия и трития.

Это предстоит сделать вам

Не станем утверждать, что физика плазмы — главная область современной науки. В физике есть и другие не менее важные направления, например астрофизика и физика высоких энергий, где мы доходим до предела наших знаний о строении вещества. Фи-



Установка Токамак.

зика плазмы занимает сейчас сравнительно скромное положение. Вместе с тем физики, исследующие плазму, решают задачу управляемого термоядерного синтеза, важную для всего человечества.

Возникает вопрос: сколько времени еще потребуется для достижения практической цели? В наши дни многоэтажный дом вырастает за несколько месяцев. Но представьте себе — строится грандиозное здание и многие строители знают, что им не суждено дожить до завершения строительства. Чтобы работать успешно, они должны верить, что здание будет достроено их преемниками. Нынешнее поколение физиков заложило фундамент и возвело первые этажи здания управляемого термоядерного синтеза. Термоядерная энергия будет получена тогда, когда она станет необходимой человечеству.

Возможно, что еще в этом веке будут построены первые термоядерные реакторы. Они будут производить еще не очень дешевую энергию, будут иметь много недостатков, но они послужат прообразом для будущих реакторов, которые предстоит создать вам.

Другие перспективные задачи

Физика плазмы служит научной основой не только для управляемого термоядерного синтеза, но и для других важных научно-технических задач. Одна из них — задача непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую.

В обычных тепловых электростанциях процесс получения электроэнергии разбивается на следующие стадии: топливо сгорает в некотором объеме и нагревает воду, образуя пар; пар попадает на лопатки турбины и вращает ее; турбина вращает ротор электрогенератора, дающего электрический ток.

Является ли такая система наилучшей? Коэффициент полезного действия системы, превращающей химическую энергию топлива в электрическую, тем выше, чем выше температура рабочего вещества, поступающего в тепловой двигатель. Но мы не можем нагреть рабочее вещество — пар или газ — до многих тысяч кельвинов, потому что не выдержат лопатки турбины. А нельзя ли вообще обойтись без турбины и электрогенератора? Тогда можно было бы повысить температуру рабочего вещества.

На помощь приходит плазма. Предположим, что топливо сгорает в камере сгорания и образующиеся горячие газы через сопло выходят в область, где создано сильное магнитное поле, перпендикулярное струе газа. Если к топочным газам добавить легко ионизирующуюся примесь, например калий, то при температуре 2500—3000 К газ будет ионизирован, т. е. превратится в плазму, а значит, станет проводником электрического тока.

Из законов физики известно, что, когда проводник пересекает силовые линии магнитного поля, в нем возникает электродвижущая сила индукции. Проще говоря, между концами проводника появляется электрическое напряжение тем большее, чем больше скорость проводника и чем больше напряженность магнитного поля.

Роль движущегося проводника выполняет горячая плазма, с большой скоростью вырывающаяся из сопла и пересекающая силовые линии магнитного поля. При этом между боковыми поверхностями плазменной струи возникает электродвижущая сила индукции, которая снимается специальными электродами и используется для питания различных потребителей. Такая система является источником энергии без всяких движущихся механических узлов и деталей. Она получила название *магнитогидродинамического* преобразователя энергии (сокращенно МГД). В нем плазма является уже источником не ядерной, а тепловой энергии, которую мы сообщили плазме нагреванием. В поперечном магнитном поле плазменная струя тормозится, т. е. теряет часть своей кинетической энергии, которая и переходит в электрическую энергию (рис. 9).

Основная сложность при разработке МГД-генераторов состоит в получении хорошо проводящей ионизированной плазменной струи. Начальную температуру газа на входе в пространство, где создано магнитное поле, не удается поднять выше 3000—3500 К. При такой температуре вырывающиеся из сопла продукты сгорания оказываются слабоионизированными и не обладают достаточно высокой теплопроводностью. Поэтому добавляют в газовую струю пары легко ионизирующихся щелочных металлов.

Для того чтобы дать общее представление о характеристиках МГД-генератора, приведем возможные

значения основных параметров. Скорость плазменной струи — около 1000 м/с, толщина струи — около 1 м. Напряженность магнитного поля — 1,6 МА/м. В этом случае э. д. с. индукции составит около 2000 В, причем во внешнюю нагрузку можно будет отвести мощность несколько тысяч киловатт. А вообще от МГД-генератора можно получать значительно большую мощность.

По-видимому, в будущем с помощью МГД-преобразователя удастся значительно поднять к. п. д. тепловых электростанций. Но уже и сейчас такие системы могут найти применение в тех случаях, когда нужны кратковременные мощные источники энергии. Роль газовой струи при этом выполняет реактивная струя, получаемая при сжигании жидкого реактивного топлива.

В МГД-генераторе плазменная струя тормозится и кинетическая энергия струи преобразуется в энергию электрического тока. Можно, наоборот, ускорить плазменную струю с помощью электрического поля и использовать ее как источник реактивной тяги. Речь идет о перспективах применения плазмы в так называемых *электрореактивных*, или *плазменных*, *двигателях*.

Одна из трудностей в осуществлении дальних космических полетов заключается в необходимости иметь очень большие запасы топлива. Космический корабль, чтобы он мог маневрировать, должен обладать каким-то источником, создающим тяговое усилие. В ракетах из сопла вырывается реактивная струя, которая и создает тягу. Чем определяется размер тяги? Он определяется расходом вещества, т. е. его массой, вытекающей из системы в единицу времени, и скоростью этого вещества. В обычных ракетных двигателях скорость реактивной струи газов составляет несколько километров в секунду. Возьмем простой пример. Пусть у вас имеется двигатель, создающий тягу всего в 100 Н. Это совсем маленькая тяга. Скорость реактивной струи выхлопных газов примем 1000 м/с. Тогда простой расчет показывает, что в сутки нужно израсходовать 8 т реактивного топлива. Восемь тонн за сутки! Представьте себе, что вы совершаете путешествие к далеким планетам. Будет просто невозможно запастись топливом.

И здесь плазма приходит на помощь. Если ускорить плазму, можно получить реактивную струю со скоростью 100 км/с, т. е. в 100 раз больше, чем у существующих ракетных двигателей. Значит, при той же самой тяге расход горючего уменьшится в 100 раз. Правда, при этом корабль должен иметь мощный источник энергии, например атомный реактор, но зато можно обойтись значительно меньшими запасами топлива.

Принципиальная схема плазменного двигателя очень проста. Представьте себе два цилиндра, вложенных друг в друга. Приложим между внутренним и внешним цилиндрами напряжение и пропустим между ними газ. При этом через газ от одного цилиндра к другому пойдет ток. Этот ток создаст магнитное поле. Как показывает расчет, поле будет ускорять плазменную струю, которая и будет создавать необходимую реактивную тягу.

На этом принципе основано действие плазменных инжекторов, используемых в физических лаборато-

Отчего плазма светится

Пролетая вблизи иона, электрон испытывает воздействие со стороны электрического поля иона и в результате этого воздействия может изменить величину и направление своей скорости. Изменение скорости, следовательно и кинетической энергии, электрона приводит к испусканию электромагнитного излучения, частота которого определяется разницей между энергиями электрона до и после взаимодействия с полем иона. Такое излучение называют тормозным. Оно возникает из-за торможения электронов в поле ионов.

Ион может не только изменить скорость пролетающего вблизи электрона, но и захватить его. Процесс соединения электрона с ионом, приводящий к образованию нейтрального атома, называют рекомбинацией. Рекомбинация также сопровождается электромагнитным излучением.

Столкновение электрона с нейтральным атомом может привести к возбуждению атома, т. е. повышению его внутренней энергии. Возбужденные атомы быстро возвращаются в нормальное состояние, испуская излишек энергии в виде излучения.

Все эти явления и приводят к свечению плазмы в дуговых разрядах, оболочках Солнца и звезд, рекламных трубках. Но так светится «холодная» плазма, имеющая температуру несколько тысяч кельвинов. Чистая высокотемпературная плазма, используемая в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу, невидима. Это не значит, что высокотемпературная плазма ничего не излучает. Просто ее излучение невидимо для глаза. Например, тормозное излучение горячей плазмы представляет собой в основном рентгеновские лучи. Кроме того, у плазмы, находящейся в магнитном поле, появляется дополнительный механизм излучения, связанный с взаимодействием движущихся электронов с магнитным полем. Это излучение лежит в диапазоне миллиметровых радиоволн.

риях для исследований по физике плазмы. В инжекторе легко разогнать сгустки плазмы до скорости порядка нескольких сотен километров в секунду.

Сделаны первые шаги по применению таких систем для реактивной тяги. На советской автоматической станции «Зонд-2» в 1964 г. были впервые в реальных условиях космического полета проведены испытания электрореактивных плазменных двигателей в качестве органов управления для системы ориентации.

Физика плазмы важна и для понимания многих процессов, происходящих в космосе, потому что в космосе мы всюду имеем дело с плазмой.

Физика плазмы развилась сейчас в очень серьезную область науки. Она найдет широкое техническое применение для решения самых животрепещущих задач, от которых зависит будущее цивилизации.

Великий закон

...Изложенное содержит далеко не все то, что увидели до сих пор через телескоп периодического закона в безграничной области химических эволюций, и тем паче не все то, что можно еще увидеть...

Менделеев

В истории развития человеческих знаний немало великих подвигов. Но только очень немногие из них можно сопоставить с тем, что было сделано Дмитрием Ивановичем Менделеевым — одним из величайших гениев мира. Научный подвиг Менделеева не имеет равных, величие его не только не стирается неумолимым временем, но продолжает расти. И никто не может сказать, будет ли когда-нибудь исчерпано до конца все содержание одного из величайших в науке обобщений — периодического закона Менделеева. Минуло сто лет со дня его открытия. История строго и придирчиво отбирает и сортирует все, что найдено и создано человеком. Поразительная, ставшая привычной четкость таблицы Менделеева из школьного учебника наших дней скрывает от нас гигантскую работу ученого по осознанию всего, что было открыто до него о превращениях вещества, работу, посильную только гению, благодаря которой стала осуществимой великая интуитивная догадка о существовании в мире нового закона — закона периодичности свойств химических элементов.

Законы природы, открытые человеком, различны по объему познанного и по тому, в каких областях познания мира они действенны. Их трудно сравнивать между собой. Но законы сравнимы по самому главному — по возможности предсказания нового, предвидения неизвестного. Периодический закон не имеет себе равных в истории науки. Менделеев указал путь направленного поиска в химии будущего. После Менделеева химики знали, где и как искать неизвестное. Много славных ученых, основываясь на периодическом законе, предсказывали и описывали неизвестные химические элементы и их свойства. Все предсказанное, новые неизвестные элементы и их свойства и свойства их соединений, законы их поведения в природе — все было найдено, все подтвердилось.

История науки не знает другого подобного триумфа. Открыт новый закон природы. Вместо разрозненных, не связанных между собой веществ перед наукой встала единая стройная система, объединившая в одно целое все элементы Вселенной.

Но не только в открытии нового заключался научный завет, оставленный Менделеевым. Он поставил перед наукой еще более грандиозную задачу: объяснить взаимную связь между всеми элементами, между их физическими и химическими свойствами.

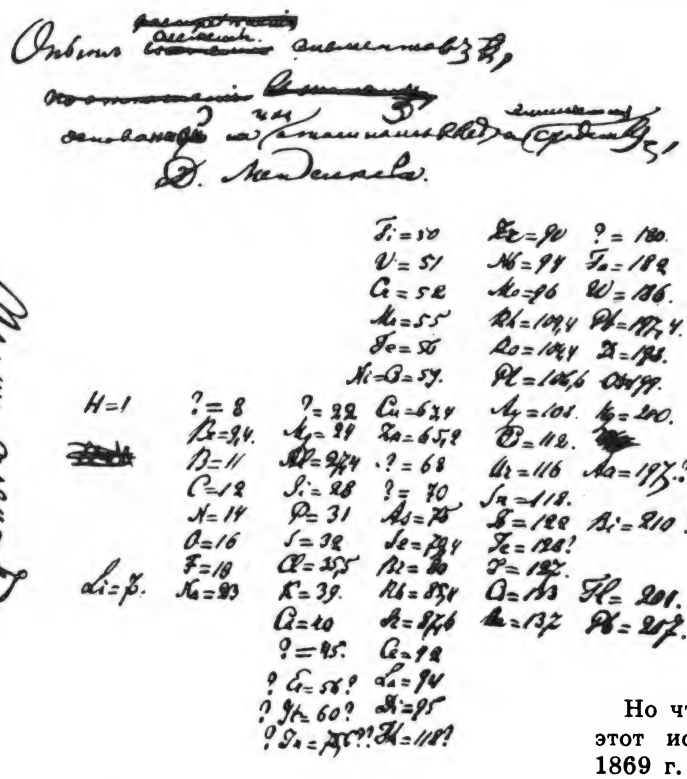
После открытия периодического закона стало ясно, что атомы всех элементов построены по единому плану, что их строение может быть только таким, какое определяет периодичность их химических свойств. На развитие знаний о строении атома, о природе вещества закон Менделеева оказал огромное и решающее влияние. В свою очередь, успехи атомной физики, появление новых методов исследования, развитие квантовой механики расширили и углубили сущность периодического закона.

Столетие со дня открытия периодического закона отмечалось во всем мире (1969).

День открытия этого закона отмечен в истории науки как начало новой эры, начало одной из наиболее могущественных наук — современной химии. К нему восходят истоки наших знаний об атоме и его строении, истоки, которые в итоге привели в наши дни человечество к овладению атомной энергией.

На этом листке 17 февраля 1869 г. Д. И. Менделеев набросал первый вариант периодической системы. Она еще совсем не похожа на привычную форму периодической таблицы элементов из учебника химии.

С этой рукописи был сделан первый в мире типографский набор периодической таблицы «Опыт системы элементов».



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ,

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti=50	Zr= 90	?=180.	
			V=51	Nb= 94	Ta=182.	
			Cr=52	Mo= 96	W=186.	
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4.	
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.	
			Ni=Co=59	Pl=106,6	Os=199.	
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.	
	Be= 9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112		
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?	
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118		
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?	
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?		
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127		
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.	
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.	
		?=45	Ce=92			
		?Er=56	La=94			
		?Yt=60	Di=95			
		?In=75,6	Th=118?			

Д. Менделѣевъ.

«Первые мысли о периодичности,— писал Д. И. Менделеев,— вложены мною в листок... который 1-го марта 1869 г. был послан мною многим ученым». Это самая первая таблица периодической системы элементов. Она далеко еще не закончена. У нее необычная и неудобная форма. В ней еще много неточностей. Самое главное в этом листочке — его историческое значение. Это он положил начало разгадке тайны строения атома. Замечательно то, что уже в этой самой первой таблице оставлены и отмечены знаком вопроса *пустые места*.

Открытие Великого закона

Открытие периодического закона было очень незаметным и скромным.

17 февраля 1869 г., собираясь в дорогу, профессор Петербургского университета Дмитрий Иванович Менделеев на обороте письма, в котором его просили приехать и помочь производству, сделал первый набросок таблицы химических элементов. В этой таблице он расположил элементы в порядке возрастания их атомных весов и проследил периодическую повторяемость их свойств.

В тот день Менделеев отложил свою поездку. Он написал на отдельных карточках *все известные* тогда элементы с их важнейшими химическими и физическими свойствами. Располагая эти карточки в различном порядке, сообразуясь с атомными весами элементов, с их свойствами и со свойствами их соединений, Менделеев составил свой первый вариант естественной системы химических элементов.

Но что же все-таки было сделано Менделеевым в этот исторический для науки день — 17 февраля 1869 г. (1 марта по новому стилю)? На этот вопрос он ответ дал сам. Вот как, по его собственным словам, была им открыта периодическая система:

«...Невольно зародилась мысль о том, что между массой и химическими свойствами необходимо должна быть связь. А так как масса вещества, хотя и не абсолютная, а лишь относительная, выражается окончательно в виде весов атомов, то надо искать функциональное соответствие между индивидуальными свойствами элементов и их атомными весами. Искать же что-либо, хотя бы грибы или какую-нибудь зависимость, нельзя иначе, как смотря и пробуя. Вот я и стал подбирать, написав на отдельных карточках элементы с их атомными весами и коренными свойствами, сходные элементы и близкие атомные веса, что быстро и привело к тому заключению, что свойства элементов стоят в периодической зависимости от их атомного веса, причем, сомневаясь во многих неясностях, я ни минуты не сомневался в общности сделанного вывода, так как случайность допустить было невозможно».

1 марта 1869 г. Менделеев разослал многим русским и зарубежным ученым небольшой листок,

содержащий первый вариант периодической системы — «Опыт системы элементов», а несколькими днями позже передал своему другу профессору Н. А. Меншуткину доклад под названием «Соотношение свойств с атомным весом элементов».

Менее двух недель продолжалась поистине титаническая работа Менделеева над открытием основного закона современной химии. За этот короткий период он сумел пройти весь путь от первого проблеска, от первой догадки о существовании нового неизвестного закона природы до его четкой формулировки, до его исчерпывающего доказательства и величайших в истории науки предсказаний.

Завершив первый этап работы над периодическим законом, Менделеев вернулся к отложенному делу, связанному с помощью промышленному производству, и уехал из Петербурга в командировку.

Первое сообщение о величайшем открытии было сделано 6 марта 1869 г. на заседании Русского химического общества. Менделеева на этом заседании не было. Вместо отсутствовавшего автора его доклад прочел Меншуткин. В протоколах Русского химического общества появилась сухая запись о собрании 6 марта 1869 г.: «Н. Меншуткин сообщает от имени Д. Менделеева опыт системы элементов, основанный на их атомном весе и химическом сходстве. За отсутствием Д. Менделеева обсуждение этого сообщения отложено до следующего заседания».

Этот сухой канцелярский протокол стал историческим документом огромной важности — свидетельством о первом знакомстве человечества с новым законом природы, который перевернул впоследствии весь ход развития научной мысли.

Но нужно признать, что ученые, современники Менделеева, впервые услышавшие и узнавшие об этой периодической системе элементов, не смогли ее сразу понять. Они остались к ней равнодушными.

Как был открыт периодический закон

А было ли все так просто, как рассказывал сам Менделеев? На первый взгляд и в самом деле нет ничего трудного в том, чтобы, написав на отдельных карточках названия элементов, их атомные веса и свойства, расположить их по порядку.

Ведь из всех способов, какими можно было бы комбинировать эти карточки, наиболее простой — расположить их в ряд по возрастанию атомного веса начиная с элемента с наименьшим весом.

Это, конечно, первое, что должно прийти в голову каждому. Подметить же закономерность в изменении свойств правильно расположенных элементов не так уж должно быть трудно. Ведь эти свойства во времена Менделеева были хорошо известны.

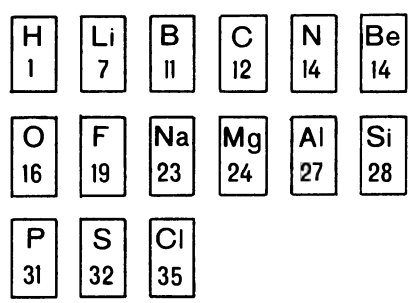
В чем же заслуга Менделеева? Давайте условимся на некоторое время забыть все, что нам уже известно о химии, все, что мы успели узнать в школе о периодической системе, вообразим, что мы перенеслись в середину прошлого века и можем знать только то, что знали современники Менделеева.

К этому времени было открыто и изучено примерно шестьдесят химических элементов. Свыше тридцати элементов было еще неизвестно, и об их существовании никто тогда и подозревать не мог.

Уже были найдены способы определения атомной массы (но здесь мы будем называть эту величину по-старому — атомный вес, как ее называл сам Менделеев). Измеряли атомный вес еще грубо, с малой точностью, и далеко не для всех элементов правильно. Для химиков времен Менделеева это была еще очень трудная задача. Неверно были определены атомные веса у многих элементов, причем, конечно, об этом тогда тоже никто не подозревал.

Как же должен был бы расположить свои карточки Менделеев? Самый малый атомный вес у водорода (H), он равен 1. Следующим по порядку был в то время литий (Li). Его атомный вес около 7. За ним шел бор (B) с атомным весом около 11. Далее углерод (C) с атомным весом 12, азот (N) с атомным весом 14, бериллий (Be) с атомным весом тоже 14, затем кислород (O), атомный вес которого равен 16, фтор (F) с атомным весом 19 и т. д.

Следовательно, в 1869 г. любой химик, желая расположить карточки с написанными на них обозначениями элементов, их атомными весами и химическими свойствами по *возрастанию атомного веса*, должен был бы составить вот такой ряд:



На этих карточках написаны округленные атомные веса с той точностью, с какой они были известны химикам в 1869 г.

А как расположил Менделеев свои карточки с элементами? Конечно, на *первой* карточке у Менделеева также были написаны: название, атомный вес и свойства водорода.

Вторую карточку с атомным весом и свойствами металла лития он поместил *под* карточкой водорода. На *третье* место рядом с литием Менделеев положил карточку, на которой было написано:

Be
9

хотя в те времена большинство химиков было твердо уверено (в соответствии со всеми данными химии бериллия), что на этой карточке должно было быть помечено:

Be
14

Почему же Менделеев, не проводя сам никаких новых исследований, не определяя атомный вес элемента бериллия, не изучая его химические свойства, осмелился исправлять атомный вес — важнейшую и, казалось бы, уже твердо установленную характеристику химического элемента? Ведь он сам никогда не занимался научными исследованиями в области химии бериллия.

На *четвертое* место Менделеев поместил карточку бора.

Пятое место занял у него углерод.

На *шестом* месте — азот, далее следовали кислород и фтор.

Девятая карточка, принадлежащая металлу натрию, была им помещена *под второй*, на которой были записаны химические характеристики металла лития.

По порядку следующее место занял магний, за ним — алюминий. Под углеродом оказался кремний, под кислородом — сера, под фтором — хлор.

Вот как Менделеев расположил свои карточки с названиями и свойствами элементов в начале своей таблицы:

H
1

Li	Be	B	C	N	O	F
7	9	11	12	14	16	19

Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
23	24	27	28	31	32	35

Итак, в вертикальных рядах оказались химически сходные элементы. Металл литий похож на металл натрий: оба мягкие, легко режутся ножом, бурно реагируют с водой, образуя щелочи. Бериллий и магний схожи друг с другом. У фтора много общего с хлором — это едкие удушливые газы, которые образуют с металлами совершенно сходные соединения. И каждый химик знает, что свойства кислорода и серы сходны между собой.

При таком расположении совершенно четко проявилась периодичность свойств у элементов. В двух первых коротких периодах менделеевской таблицы правильно чередуются элементы с аналогичными свойствами.

Как же все-таки эти периоды были построены Менделеевым? Пожалуй, он был не прав, когда утверждал, что расположил элементы по их атомному весу.

Если бы он действительно расположил их по возрастанию тех атомных весов, которые были *известны* науке в то время, то никакого периодического закона обнаружить было бы невозможно даже в первых рядах таблицы. Скорее наоборот, Менделеев установил на основании периодического закона правильный атомный вес бериллия.

Позднейшие исследования подтвердили это предсказание.

Если исходить из атомных весов, известных в середине прошлого века, то следующие два горизонтальных ряда элементов, идущих за хлором, надо было бы построить так:

K	Ca	V	Cr	Ti	Mn	Fe	Co
39	40	51	52	52	55	56	59

Ni	Cu	Zn	As	Se	Br
59	63	65	75	78	80

Тайна пустого места

Но, продолжая построение своей таблицы, Менделеев разместил карточки совсем не так.

Под карточкой натрия была помещена карточка с очень похожим на натрий калием, и калий стал началом нового ряда. Под магнием тогда оказался тоже очень сходный с ним кальций.

Следующим, в порядке возрастания атомного веса, должен был бы идти *ванадий*, но его карточка

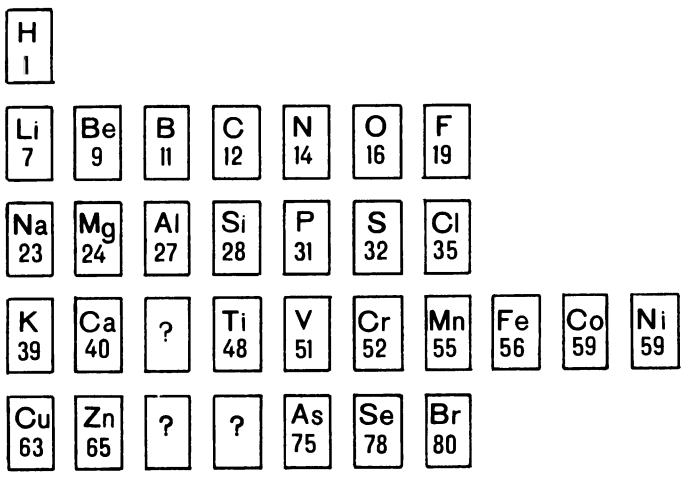
пока отложена в сторону, а вместо нее рядом с кальцием Менделеев кладет *пустую* (!) карточку. С точки зрения химика прошлого столетия это непонятный и ничем не оправданный поступок.

Вслед за пустой карточкой можно было ждать, что будет положена карточка ванадия. Но вместо ванадия на следующем месте оказывается *титан*, у которого Менделеев осмеливается, не проводя сам никаких исследований, вопреки всему, что известно о титане всем химикам во всем мире, изменить произвольно его атомный вес с 52 на 48 (!). После чего, наконец, за титаном следует карточка *ванадия*, и только за ней идут карточки *хрома* и *марганца*.

Как же все-таки располагал свои карточки Менделеев? Ведь и в этом ряду таблицы он разместил элементы *вопреки* возрастанию известных в то время атомных весов. Прежде чем поместить карточку титана в таблицу, Менделеев, по существу, предсказал истинное значение его атомного веса так же, как это он сделал для бериллия.

Этот период в таблице Менделеева длинный. За марганцем идут железо (Fe) — 56, кобальт (Co) — 59, никель (Ni) — 59, далее медь (Cu) — 63, цинк (Zn) — 65. Но вслед за цинком ученый снова оставил в своей таблице подряд *два пустых места*.

Далее следовали карточки с хорошо известными элементами — мышьяком, селеном и карточка с бромом, завершающая длинный период. При этом карточки мышьяка, селена и брома оказались лежащими под *сходными* с ними элементами конца предыдущего короткого периода: фосфором, серой и хлором.



Из того, что мы разобрали, совершенно очевидно, что все обстояло далеко не так просто, как скромно рассказывал сам Менделеев.

Одних только фактов, которые были известны химикам до Менделеева, как бы их ни комбинировать, не было достаточно, чтобы открыть один из величайших законов природы — периодический закон. Нужно было не только знать накопленный в течение многих веков химический опыт. Надо было обладать гениальностью и особенно тонкой интуицией, чтобы охватить всю необозримую совокупность бесчисленного множества химических явлений и глубоко почувствовать скрытую в них закономерность.

Нужно было обладать особой революционной смелостью, чтобы, осознав эту закономерность, исправлять старое и предсказывать новое в науке.

Великое предсказание

Что же означают пустые места в таблице Менделеева? Может быть, это пробелы в природе, и потому химики не нашли элементы, подходящие к пустым клеткам таблицы? Или это пробелы в человеческом знании о природе? Существует ли, например, в природе элемент, атомный вес которого больше, чем у кальция, и меньше, чем у титана, и в то же время похожий химическими свойствами на бор и алюминий?

У Менделеева сомнений не было. Каждое место в таблице соответствует определенному химическому элементу, который должен обязательно существовать.

Места, на которых были расположены карточки с названиями элементов, клетки в периодической таблице, где вписаны символы элементов и их атомные веса, для великого ученого были полны глубочайшего содержания: они определяли всю природу каждого элемента, все его физические и химические свойства и свойства всех его соединений.

В 1871 г. в журнале Русского химического общества появилась большая работа Менделеева. Она называлась «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов». Вряд ли в мировой научной литературе когда-либо была опубликована статья, похожая на эту! В ней Менделеев описал три никем, никогда и нигде в мире не виданных химических элемента, причем описал их так обстоятельно, как не смог бы это сделать иной ученый-исследователь, державший в руках их соединения и посвятивший долгие годы опытному изучению их в лаборатории.

Во всей истории науки трудно найти что-либо равное этому необычайному выступлению русского химика — не только по научной смелости, по революционной глубине высказанных в нем мыслей, но и по огромному влиянию этой статьи на развитие не только химии, но и всей науки в течение столетия, вплоть до наших дней.

«Решаюсь сделать это ради того, чтобы хотя со временем, когда будет открыто одно из этих предсказываемых мною тел, иметь возможность окончательно увериться самому и уверить других химиков в справедливости тех предположений, которые лежат в основании предполагаемой мною системы»,— писал в этой статье Менделеев.

Каким же путем периодический закон дает возможность описывать неведомое? Каким образом место в таблице определяет свойства элемента? Лучше всего это можно понять, если попытаться, по примеру Менделеева, сравнить свойства элемента пустой клетки со свойствами его соседей. Выделим из таблицы ту часть, которая включает пустые места и окружающие их элементы.

Пустая клетка между кальцием и титаном находится в начале четвертого периода, а две пустые клетки, расположенные рядом между цинком (Zn) и мышьяком (As), находятся в конце этого периода.

Гипотетический (предполагаемый) элемент, который должен был занимать первое пустое место, Менделеев назвал *экабором*. В таблице он следует за кальцием. Тот элемент, который должен занять пустое место около цинка, Менделеев назвал *экаалюминием*, а соседний с ним — *экасилицием*.

	II	III	IV	V
2	Be 9	B 11	C 12	N 14
3	Mg 24	Al 27	Si 28	P 31
4	Ca 40	?	Ti 48	V 51
	Zn 65	?	?	As 75
5	Sr 88	Y 89	Zr 91	Nb 94
	Cd 112	In 114	Sn 119	Sb 120

Пустое место экабора находится между кальцием (атомный вес 40) и титаном (атомный вес 48). Следовательно, атомный вес экабора должен быть близок к среднему значению:

$$\frac{40+48}{2}=44.$$

С кислородом он должен давать окись, аналогичную по составу с окисями бора и алюминия: X_2O_3. Сам экабор должен быть легким металлом: он ведь стоит между двумя легкими металлами — кальцием и титаном. Относительная плотность соседей экабора по ряду позволяет определить и его относительную плотность. Для кальция она равна 1,6, для титана — 5,2. Поэтому относительная плотность экабора должна быть приблизительно равна:

$$\frac{1,6+5,2}{2}=3,4.$$

У экабора должны быть бесцветные соли, потому что соседи образуют бесцветные соединения.

Из растворов его солей экабор можно осаждать содой, его углекислая соль будет нерастворимой, потому что его соседи образуют нерастворимые углекислые соли.

Попробуем описать и еще один элемент, пустое место которого находится рядом с цинком,— экаалюминий.

Между цинком и мышьяком Менделеев оставил два пустых места. Атомный вес мышьяка — 75, цинка — 65. Нетрудно сообразить, что экаалюминий должен обладать атомным весом около 68. Он помещается в третьем столбце рядом с металлом цинком; в этом столбце находится алюминий — тоже металл, и экаалюминий должен быть на него похожим. Значит, экаалюминий будет тоже металлом.

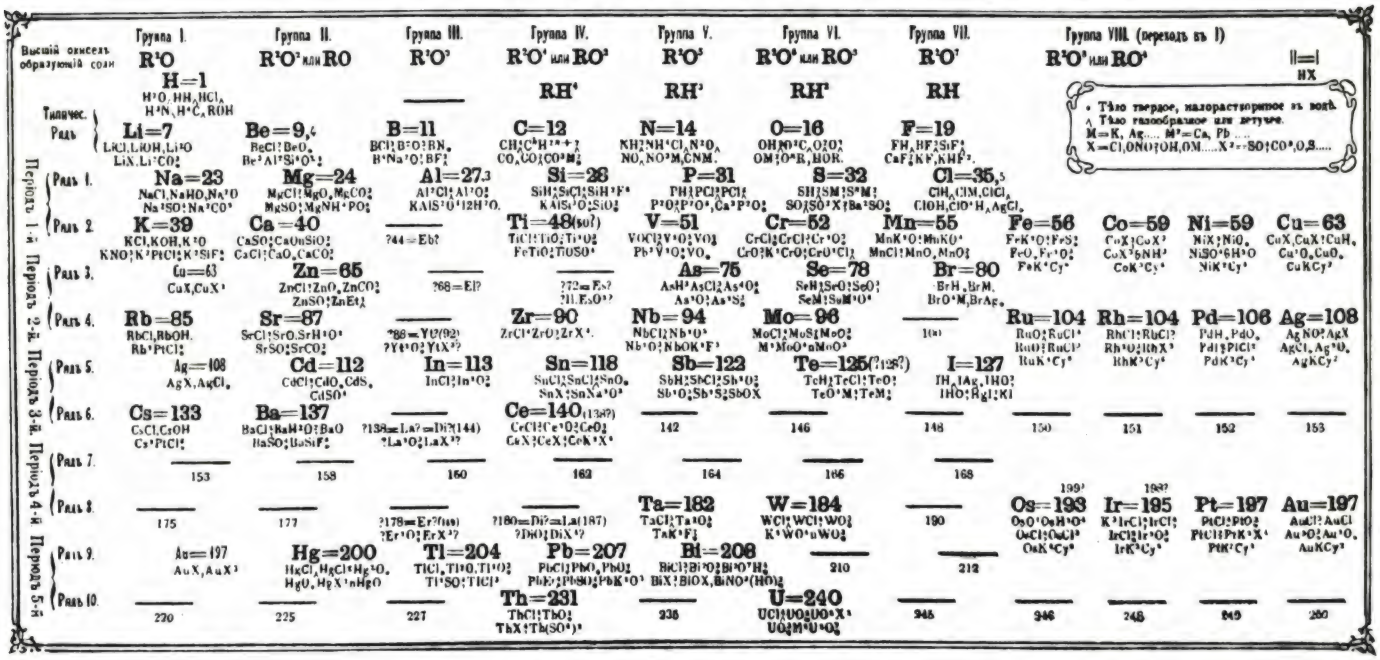
Плотность его мы определили бы по известной плотности ближайших соседей, учитывая лишь, что рядом с экаалюминием есть еще одно пустое место — экасилиций. Относительная плотность экаалюминия должна быть близка к 6,0. Так же как и экабор, экаалюминий можно осадить содой из растворов его солей.

Соединения алюминия с хлором обладают при высокой температуре летучестью, и хлористое соединение экаалюминия должно быть также летучим.

Вот какими словами Менделеев заканчивает описание свойств экаалюминия: «Можно надеяться, что он будет открыт спектральным исследованием, подобно тому как открыты следующие за ним индий и таллий...»

Таким образом, Д. И. Менделеев не только описал неведомое, но и предсказал, как оно будет познано.

Эта таблица была помещена Д. И. Менделеевым в одном из первых изданий его учебника «Основы химии» (1871). В ней еще очень много пустых мест. Еще не открыты галлий, скандий и германий, и их места занимают пока еще не оправдавшие предсказания о своем существовании экаалюминий, экабор и экасилиций. Совершенно отсутствует нулевая группа, о существовании в природе благородных газов пока еще никто в мире не подозревал. Особенно интересно, что Менделеев в этой таблице



Как оправдались предсказания Менделеева

Не прошло и шести лет, как весь мир облетело известие: в 1875 г. молодой французский ученый-спектроскопист Лекок де Буабодран выделил из минерала, добытого в Пиренейских горах, новый элемент. Буабодрана навела на след слабая фиолетовая линия в спектре минерала, которую нельзя было приписать ни одному из известных химических элементов. В честь своей родины, которая в древности называлась Галлией, Буабодран назвал новый элемент галлием. Галлий — очень редкий металл, и Буабодрану стоило большого труда добыть его в количестве немногим больше булавочной головки. Но Буабодран оказался большим искусником. Он ухитрился с этой крупинкой проделать много интересных опытов и подробно описал плотность галлия, температуру плавления, соединение с кислородом и даже соли.

Каково же было удивление Буабодрана, когда через Парижскую академию наук он получил письмо с русской маркой, в котором сообщалось: в описании свойств галлия все верно, за исключением плотности: галлий тяжелее воды не в 4,7 раза, как утверждал Буабодран, а в 5,9 раза.

Неужели кто-то другой открыл галлий раньше? Буабодран заново определил плотность галлия, подвергнув металл более тщательной очистке. И оказалось, что он ошибся, а автор письма — это был, конечно, Менделеев, который и не видел галлия,— прав: относительная плотность галлия не 4,7 а 5,9.

Еще через 4 года, в 1879 г., шведский химик Нильсон нашел новый неизвестный элемент в редком минерале гадолините. Его назвали скандием. Когда же были изучены его свойства, стало совершенно очевидно, что это не что иное, как давно известный, по предсказаниям Менделеева, экабор.

А через 15 лет после предсказания Менделеева (в 1886 г.) немецкий химик Винклер открыл новый элемент и назвал его германием.

На этот раз Менделееву не пришлось самому указывать, что и этот вновь открытый элемент был им предсказан ранее. В своем сообщении Винклер отметил, что его германий полностью соответствует экасилицию Менделеева.

Он писал в своей работе: «Едва ли можно найти иное более поразительное доказательство справедливости учения о периодичности, как во вновь открытом элементе. Это не просто подтверждение смелой теории, здесь мы видим очевидное расширение химического кругозора, мощный шаг в области познания».

Винклер не искал германий по приметам, опубликованным Менделеевым. Он наткнулся на него

предусмотрел пять свободных мест за ураном. Примечательно, что для каждого элемента приведены формулы его наиболее характерных соединений. Периодический закон еще не завоевал всеобщего признания и еще нуждался в дополнительном обосновании.

случайно. Получилось так, что еще не открытые химические элементы как бы взяты на учет: их столько, сколько пустующих клеток в периодической таблице Менделеева. Приметы каждого из них в точности известны, и даже можно предсказать заранее, в каких минералах нужно их искать, какими химическими способами следует извлекать эти элементы из минералов, в которых они скрываются.

Существование в природе более десяти новых, не известных никому элементов предсказал сам Менделеев. Для десятка элементов он предсказал правильные атомные веса. Все последующие поиски новых элементов в природе велись исследователями при помощи периодического закона. Этот закон не только помогал ученым в поисках истины, но и способствовал исправлению ошибок и заблуждений в науке.

В 1864 г. был «открыт» элемент «ильмений». Для него был установлен атомный вес 114. По некоторым свойствам он был похож на марганец. Казалось, что его следует поместить в свободную клетку таблицы, где должен был находиться предсказанный Менделеевым экамарганец. Но Менделеев отказался это сделать. Он заявил, что «ильмений» своими свойствами не соответствует требованиям периодического закона и что такой элемент существовать в природе не может. «Открытие» «ильмения» просто ошибка. Менделеев оказался прав. Вскоре было доказано, что такого элемента в природе нет.

Великое испытание периодического закона

26 октября 1868 г. на заседании Парижской академии наук были прочитаны одно за другим два письма. Одно было прислано из Индии, от французского астронома Жансена, другое — из Англии, от английского астронома Локьера. Оба сообщали, что в спектре солнечных протуберанцев они (независимо друг от друга) обнаружили новую желтую линию, которая не может принадлежать ни одному химическому элементу из существующих на земном шаре. Было решено, что новая линия в спектре принадлежит какому-то особому «небесному» элементу. Он был назван древнегреческим именем Солнца — гелий.

Спустя 25 лет после открытия гелия на Солнце знаменитый английский физик Джон Рэлей обнаружил очень странный факт: плотность чистого азота, добытого из воздуха, больше плотности того же азота, полученного из любого азотного соединения. Разница была ничтожна — тысячные доли грамма на литр, но она была.

Рэлей написал об этом письмо в лондонский журнал «Природа». Он спрашивал, не сумеет ли кто-нибудь из читателей журнала объяснить, почему «воздушный» азот тяжелее. Но ответов не последовало. Тогда Рэлей обратился к своему другу — известному английскому химику Рамзаю, и они решили, что каждый из них не покинет свою лабораторию, пока загадка не будет разгадана. Они работали разными методами и, наконец, нашли, что в обычном воздухе существует какая-то примесь, и не малая: в каждом литре воздуха содержится около 10 $см^3$ еще неизвестного газа. Они дали ему имя аргон. Странный это был газ. Подобных веществ химики еще не знали. Никакими средствами им не удавалось заставить его вступать в химические реакции. Это и было выражено в его названии: по-гречески «аргон» значит «ленивый».

Аргон оказался новым химическим элементом. Затем Рамзай узнал, что известный химик Гильдебрант наблюдал некоторые минералы (они содержали уран или торий), которые при нагревании выделяют какой-то негорючий газ. Рамзай решил проверить, не аргон ли это.

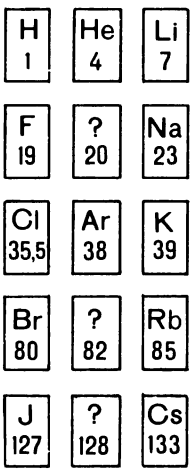
Но газ, выделившийся из минерала клевеита, оказался не аргоном. У него был совершенно другой спектр, отличный от уже изученного спектра аргона. Рамзай дал ему имя «криптон» («тайный») и послал запаянную пробирку с «криптоном» одному из опытных спектроскопистов английскому химику и физику Круксу для точного исследования спектра. В ответ он получил телеграмму: «Криптон — это гелий. Приходите и поглядите. Крукс». Так газ, впервые за четверть века до этого найденный на Солнце, был наконец обнаружен на Земле. Гелий оказался самым легким газом после водорода.

Но периодический закон не предусматривал существования таких химических элементов, как гелий и аргон. Для них в периодической системе не было пустых клеток. Куда же поместить новые элементы? Скептики снова воспрянули духом, снова зазвучали голоса сомневающихся в периодической системе и периодическом законе. Но это продолжалось недолго.

В 1897 г. Рамзай прочел доклад, который он озаглавил так: «Еще не открытый газ». Рамзай сказал: «По образцу нашего учителя Менделеева я описал, поскольку возможно было, ожидаемые и предполагаемые соотношения газообразного элемента, который должен был бы заполнить пробел между гелием и аргоном».

Места для гелия и аргона в таблице нашел Рамзай. Они были помещены в новый, нулевой, столбец между седьмым, где были фтор и хлор, и первым, где разместились металлы, подобные литию и калию. Отсюда следовало, что должен существовать газ, столь же инертный, как аргон, но легче его — с атомным весом 20.

Руководствуясь предсказанными свойствами, Рамзай предпринял поиски нового газа и нашел его в сжиженном воздухе. Этот газ получил название «неон», что значит «новый», а вскоре были найдены и остальные элементы новой группы: криптон, ксенон и затем радон.



Так были предсказаны Рамзаем на основании периодической системы благородные газы. По существу это было сделано совершенно так же, как Менделеев предсказал галлий, германий и скандий. Все пустые места вскоре заняли вновь открытые элементы: неон, криптон и ксенон. Атомные веса на карточках приближенные.

Из нового испытания периодический закон вышел с победой. Иначе и не могло быть! После этого ни у кого в мире не оставалось сомнения в истинности периодического закона Менделеева. Этот успех был заслуженным. Великий закон доказал единство вещества во Вселенной. Он внес стройность и порядок в невообразимую путаницу бесчисленного множества фактов, наблюдений, измерений, накопленных химией к середине прошлого века за сотни лет. Он дал могучий метод для изучения химических элементов и их свойств. Сам Менделеев исправил атомные веса многих элементов, известных ранее, в том числе, например, урана. Периодический закон дал возможность предсказывать новое — это истинный закон природы.

Но не все было ясно в периодическом законе. Были необъяснимые исключения: атомный вес аргона (39,9) оказался большим, чем атомный вес калия (39,1), а аргон в таблице стоит *перед* калием. Атомный вес кобальта превышал атомный вес никеля, хотя по свойствам кобальт в периодической системе должен был *предшествовать* никелю. И у теллура, стоящего *перед* иодом, атомный вес оказался больше, чем у иода. Не только это было неясным в таблице. Было твердо установлено, сколько должно быть элементов в первых периодах таблицы, но оставалось совершенно неясным, сколько элементов должно быть в ее последних периодах.

Самое же главное, что было неясным,— это сам периодический закон. Он требовал от науки решить величайшую, казалось бы, неразрешимую задачу: объяснить периодичность химических свойств у элементов, из которых состоит весь окружающий нас мир.

Как радиоактивные элементы нашли свои места в таблице Менделеева

Развитие науки поставило периодический закон перед новым, еще более суровым испытанием, чем те, из которых он уже с честью вышел.

Это было в конце прошлого — начале нашего века. Во Франции двое скромных ученых — супруги Пьер и Мария Кюри — заинтересовались странным явлением, которое открыл другой французский ученый — Беккерель. Они решили выяснить, почему минералы и руды, содержащие уран, испускают загадочные невидимые лучи, способные проникать через непрозрачные тела и действовать на фотографическую пластинку. Очень скоро они обнаружили, что в природе существуют такие минералы, в которых урана мало, а на пластинку эти минералы действуют гораздо сильнее, чем чистый уран. Супруги Кюри предприняли кропотливые, занявшие долгие годы их жизни поиски новых неведомых элементов — носителей радиоактивного излучения (см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов»).

Первым был открыт полоний, вслед за ним — радий. Это были новые элементы, их наука еще не знала. Радиоактивность этих элементов была в тысячи раз сильнее, чем урана. Чудесные свойства резко отличали их от всех известных ранее элементов.

Довольно быстро, как только были изучены химические свойства новых элементов, они нашли свои места в периодической системе. Оказалось, что оба элемента — и полоний и радий — также когда-то были предсказаны Менделеевым. Радий — это был экабарий, он занял 88-ю клетку в периодической системе, полоний — 84-ю. Его Менделеев называл *экателлуром*. Значит, место для них было, и

Періодическая система элементовъ по группамъ и рядамъ.

Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ: 0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	—	Водородъ H 1,008	—	—	—	—	—	—	
2	Гелій He 4,0	Литій Li 7,03	Берилій Be 9,1	Боръ B 11,0	Углеродъ C 12,0	Азотъ N 14,01	Кислородъ O 16,00	Фторъ F 19,0	
3	Неонъ Ne 19,9	Натрій Na 23,05	Магній Mg 24,36	Алюминій Al 27,1	Кремній Si 28,2	Фосфоръ P 31,0	Сѣра S 32,06	Хлоръ Cl 35,45	
4	Аргонъ Ar 38	Калій K 39,15	Кальцій Ca 40,1	Скандій Sc 44,1	Титанъ Ti 48,1	Ванадій V 51,2	Хромъ Cr 52,1	Марганецъ Mn 55,0	Желѣзо Fe 55,9 / Кобальтъ Co 59 / Никкель Ni 59 (Cu)
5		Мѣдь Cu 63,6	Цинкъ Zn 65,4	Галлій Ga 70,0	Германій Ge 72,5	Мышьякъ As 75	Селенъ Se 79,2	Бромъ Br 79,95	
6	Криптонъ Kr 81,8	Рубидій Rb 85,5	Стронцій Sr 87,6	Итрій Y 89,0	Цирконій Zr 90,6	Ніобій Nb 94,0	Молибденъ Mo 96,0	—	Рутеній Ru 101,7 / Родій Rh 103,0 / Палладій Pd 106,5 (Ag)
7		Серебро Ag 107,93	Кадмій Cd 112,4	Индій In 115,0	Оловo Sn 119,0	Сурьма Sb 120,2	Теллуръ Te 127	Іодъ J 127	
8	Ксенонъ Xe 128	Цезій Cs 132,9	Барій Ba 137,4	Лантанъ La 138,9	Церій Ce 140,2	—	—	—	— — —
9		—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	Иттербій Yb 173	—	Тантанъ Ta 183	Вольфрамъ W 184	—	Осмій Os 191 / Иридій Jr 193 / Платина Pt 194,8 (Au)
11		Золото Au 197,2	Ртуть Hg 200,0	Таллій Tl 204,1	Свинецъ Pb 206,9	Висмутъ Bi 208,5	—	—	
12	—	—	Радій Rd 225	—	Торій Th 232,5	—	Уранъ U 238,5		

Высшія солеобразныя окисды:

R | R²O | RO | R²O³ | RO² | R²O⁵ | RO³ | R²O⁷ | RO⁴

Высшія газообразныя водородныя соединенія:

| | | RH⁴ | RH³ | RH² | RH |

Д. Менделѣевъ. 1869—1905.

Эта периодическая таблица была помещена в восьмом издании «Основ химии», которое вышло в 1906 г. и было последним при жизни автора. Она уже очень похожа на таблицу, которую теперь изучают школьники, и очень отличается от первых вариантов. В ней значительно меньше пустых клеток. Уже заняли свои места предсказанные Менделеевым галлий, скандий и германий, уже открыт радий, который также был предсказан Менделеевым и описан под названием экабария. Открыты благородные газы, нашедшие свое место в таблице в новой, нулевой группе. Еще недостаточно изучены редкие земли, и их положение в таблице пока не определилось. Обратите внимание, что элементы в этой таблице еще не перенумерованы.

казалось, что все благополучно. Но когда были изучены подробно свойства новых радиоактивных элементов, обнаружились совершенно неожиданные для науки явления.

Самым важным было то, что с открытием радиоактивных элементов рухнули привычные и, казалось, незыблемые представления о вечности и неизменности каждого элемента. Новые элементы были непостоянными, они рождались и исчезали, превращаясь в другие элементы. Одни из них исчезали в течение миллионных долей секунды, другие жили тысячи лет. Их свойство испускать невидимые лучи свидетельствовало о распаде атомов.

Было найдено, что радий — далекий потомок урана. Сам радий превращается в радиоактивный газ радон. И при каждом превращении радиоактивный атом обязательно испускает либо заряженные ядра атомов гелия (α-частицы), либо электроны (β^--частицы). Вскоре физики нашли более тридцати радиоактивных элементов.

Сколько потомков оказалось у урана, вы можете сами подсчитать (см. в ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов» рис. 4 и 5).

Не меньше потомков было найдено и у элемента тория, который также оказался радиоактивным. И почти столько же — в ряде актиния.

Перед наукой снова встал трудный и принципиально важный вопрос: где и как найти места в периодической системе для всех этих новых многочисленных элементов? Их было гораздо больше, чем оставалось свободных клеток в таблице. Эту задачу пришлось науке решать уже без участия Менделеева. Он не дожил до последнего, самого трудного испытания своей великой идеи.

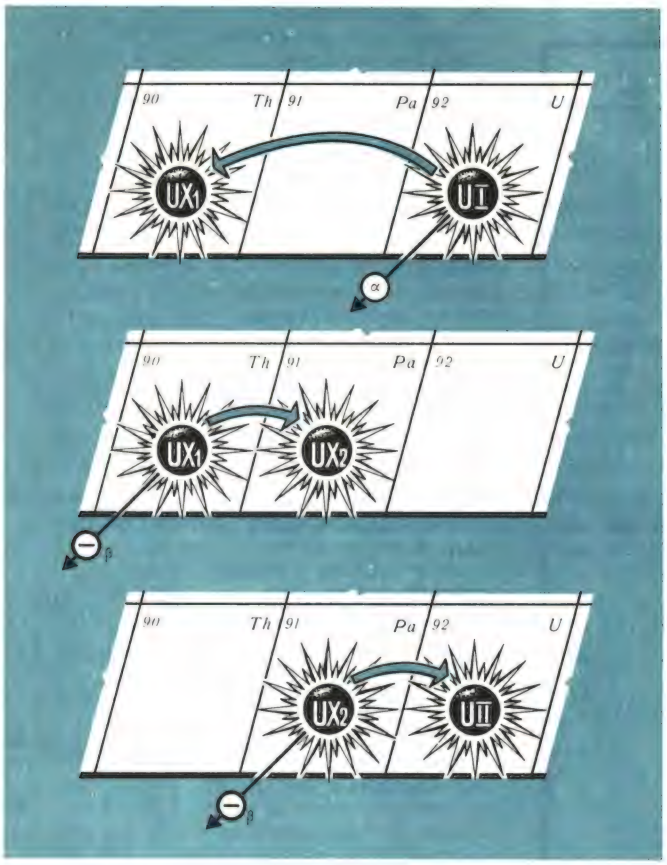


Рис. 1.

Рис. 2.

Рис. 3.

Химики занялись определением химических свойств новых радиоактивных элементов. Это была трудная задача. Ведь среди этих элементов были такие, которые «жили» ничтожные доли секунды. Разгадка была найдена, когда радиоактивные элементы были настолько изучены, что стало возможным сопоставить природу лучей, испускаемых элементом, с его химической природой и с природой того нового элемента, который из него образуется при радиоактивном превращении. Но разгадать все это удалось опять-таки с помощью периодической системы Менделеева.

Изучая свойства урана-X_1 — ближайшего потомка урана, его «сына», химики скоро убедились, что химическими свойствами он неотличим от давно известного тория. Но все же это не был знакомый химикам торий. Торий — обычный элемент, его радиоактивность так слаба, что ее трудно обнаружить. А уран-X_1 сильно радиоактивен, быстро распадается, через 24 дня от него остается только половина того количества, которое было раньше.

В общем это новый элемент. Но все же химически это торий. Если уран-X_1 смешать с торием, никакими химическими реакциями их разделить невозможно.

Уран превращается в уран-X_1, испуская α-лучи (рис. 1). На каждый распавшийся атом урана из его ядра вылетает α-частица и уносит два положительных заряда. Уран занимает 92-е место в таблице, в седьмом периоде. А где должен быть его первый потомок, уран-X_1? Менделеев поместил торий в 90-ю клетку своей системы. А уран-X_1 неотличим от тория. После долгих и трудных поисков и колебаний пришлось признать, что место для урана-X_1 — в клетке, где находится торий; *α-частица уносит из ядра атома два положительных заряда*, и при этом образуется новый атом, занимающий в периодической таблице место с номером, *на две единицы меньшим*.

Проследим теперь, что дальше происходит с ураном-X_1 при его распаде (рис. 2). Он испытывает β^--превращение, образуя новое радиоактивное вещество, которое было обозначено как уран-X_2, еще быстрее исчезающее. Оказалось, что по химическим свойствам уран-X_2 должен быть помещен в 91-ю клетку.

Но потеря одного отрицательного заряда ядром атома равноценна приобретению одного положительного заряда. В результате получилось, что *при увеличении положительного заряда ядра элемента на единицу* образуется новый элемент, занимающий в периодической системе клетку, *номер которой на единицу больше*. В свою очередь уран-X_2 снова теряет β^--частицу (рис. 3) и превращается в уран-II, который совершенно неотличим от своего «прадеда» — обычного урана и должен быть помещен в одной клетке с ним, т. е. занять 92-е место в таблице. И всегда увеличение в ядре положительного заряда на единицу (потеря одного отрицательного электрона) приводит к такому изменению химических свойств, которое соответствует увеличению порядкового номера элемента на единицу.

Этот закон, управляющий путешествием атомного ядра по менделеевской таблице при радиоактивном распаде, получил в науке название *правила сдвига*.

Изучая радиоактивные элементы, химики столкнулись с новым, невозможным и немыслимым с точки зрения старой химии фактом. Посмотрите сами, что получилось. Атомный вес урана — 238. Каждый атом его на пути радиоактивного превращения до урана-II теряет последовательно одну α-частицу (т. е. ядро атома гелия, атомный вес которого 4) и две β^--частицы (это легкие, с ничтожной массой электроны). В результате заряд ядра атома радиоактивного урана-II оказывается таким же, как у обычного урана. И своими химическими свойствами он от обычного урана неотличим.

Но атомный вес становится, конечно, совершенно другим. Каждая вылетающая α-частица уменьшает атомный вес на четыре единицы, а при β-превращениях он остается таким же.

Изменение атомного веса урана:

U·I — α — β — β = U·II
238 — 4 — 0 — 0 = 234

В одной и той же клетке, где, как считал Менделеев, должен быть только один элемент со своим, присущим только ему атомным весом, теперь оказались два разных вещества, с разными физическими признаками, и самое главное, хотя и с разными атомными весами, но с одинаковыми химическими свойствами. Оказалось, что *один и тот же элемент может обладать различным атомным весом.*

Но этого мало. Был получен еще более удивительный результат: при β-распаде атомный вес не меняется, а химическая природа элемента меняется очень резко.

Уран-X_1 по химическим свойствам — это торий, а уран-X_2 химически неотличим от элемента протактиния (Pa); следовательно, *у разных элементов может быть одинаковый атомный вес.*

Что же в конце концов получилось? Как основной признак элемента Менделеев принял атомный вес. Но в ряде радиоактивного распада урана конечный продукт — радий-G, его атомный вес *206*. Этот элемент уже неактивен, а химически неотличим от свинца.

При распаде тория в конце концов образуется тоже неактивный торий-D, его атомный вес *208*. По химическим свойствам это тоже свинец.

Ряд распада актиния обрывается на неактивном продукте — актинии-D, его атомный вес *207*, а химически он опять-таки свинец.

Но мало этого, в этих рядах есть еще радиоактивные промежуточные продукты распада: радий-B с атомным весом 214, радий-D с атомным весом 210, торий-B, атомный вес которого 212, и актиний-B с атомным весом 211.

И все эти радиоактивные элементы, все до одного, абсолютно сходны со свинцом, и все они обладают разными атомными весами.

Но ведь в каждой клетке может быть только один элемент с его собственным атомным весом! В клетке

Предшественники Менделеева

Великое открытие в науке, конечно, никогда не бывает внезапным. И до Д. И. Менделеева многие химики пытались отыскать общие закономерности и сходство в свойствах химических элементов. Например, немецкий ученый И. Дёберейнер еще в 1829 г. установил, что элементы со сходными химическими свойствами могут быть сгруппированы по три: скажем, литий, натрий и калий или хлор, бром и иод. Такие группы Дёберейнер назвал триадами.

В 1849 г. систематикой элементов заинтересовался русский химик Г. И. Гесс. В своем учебнике «Основания чистой химии» он рассматривал четыре группы элементов-неметаллов, имеющих сходные химические свойства:

иод	теллур	углерод	азот
бром	селен	бор	фосфор
хлор	сера	кремний	мышьяк
фтор	кислород		

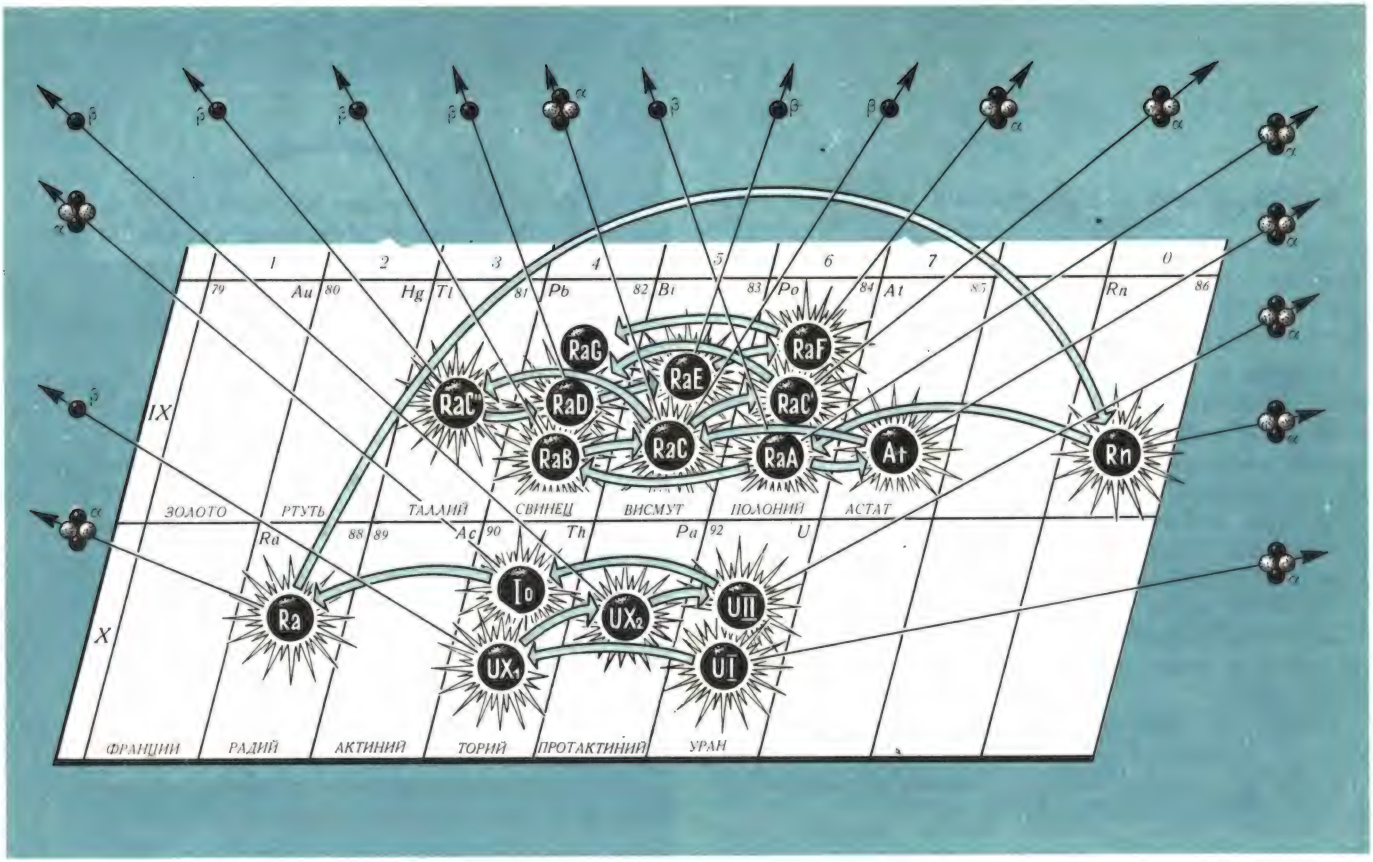
Гесс писал: «Эта классификация еще очень далека от того, чтобы быть естественной, но она все-таки соединяет элементы в группы весьма сходные, и с расширением наших сведений она может усовершенствоваться».

Следующий шаг сделал французский химик Бегье де Шанкуртуа. Систему элементов он представлял себе в виде спиральной линии на поверхности цилиндра. На каждом витке по 16 элементов. Сходные элементы располагались друг под другом на образующей цилиндра. Но никто из ученых и не обратил внимания на работу де Шанкуртуа.

Английский химик Джон Ньюлендс в 1866 г. предложил так называемый закон октав. Он считал, что все в мире подчиняется общей гармонии. И в химии, и в музыке она должна быть единой. Поэтому свойства химических элементов, расположенных по возрастанию атомной массы, должны повторяться через каждые семь элементов, так же как в музыкальной гамме сходные ноты чередуются в октаве через каждые семь нот. По закону октав, однако, оказывались сходными такие совершенно различные элементы, как углерод и ртуть. Когда Ньюлендс доложил о своей работе на заседании Лондонского химического общества, один из присутствующих не без сарказма спросил, не пробовал ли уважаемый докладчик расположить элементы в алфавитном порядке и не обнаружил ли он и при этом какую-нибудь закономерность.

Ближе других к истине оказался, пожалуй, немецкий химик Л. Мейер. В 1868 г. он предложил таблицу, в которой все известные химические элементы были разбиты на шесть групп, согласно их валентности.

Но никто из этих славных химиков, много сделавших для подготовки периодического закона, и не подозревал, что в их знаниях о природе элементов есть «пустые места», открыть Великий закон они не могли. Это оказалось под силу только гению Менделеева.



82 может быть свинец с атомным весом 207,19. Изучая радиоактивные элементы, ученые нашли еще семь веществ с атомными весами 214, 212, 211, 210, 208, 207, 206 и химическими свойствами свинца.

Наука оказалась в очень большом затруднении. Как же их разместить в периодической таблице? Их нельзя считать разными элементами, все они — свинец, но считать одним элементом, одной разновидностью атомов тоже нельзя — у них разные атомные веса.

В конце концов стало ясно, что все они должны занимать одно место в таблице Менделеева. Именно поэтому их так и называют — «изотопы» (от греческих слов, обозначающих «одинаковый» и «место»).

Кроме того, оставалась необъяснимой загадочная непоследовательность в ходе изменения атомного веса у пар элементов аргон — калий, кобальт — никель, теллур — иод. Сам Менделеев был вынужден расположить их в таблице, нарушив порядок увеличения их атомных весов: аргон был «тяжелее» калия, кобальт — никеля, теллур — иода.

Это испытание для периодического закона было очень тяжелым. Оно поставило под сомнение основу периодической системы. Стало совершенно ясно, что атомный вес не может служить величиной, которая определяет химические свойства элемента. И наука снова встала перед сложной задачей.

В чем основа Великого закона

Периодический закон — великий закон природы, открытый Менделеевым, остается незыблемым. Но атомный вес, принятый им в качестве основной характеристики химического элемента, не выдержал испытания.

Именно изучение радиоактивных элементов дало возможность найти ответ на этот важный для познания окружающего нас мира вопрос. Что же заменило атомный вес? Что вместо него определяет теперь положение каждого элемента в нашей современной менделеевской таблице?

Проследите внимательно по периодической системе элементов за путешествием распадающегося радиоактивного ядра (рис. 4). По пути атом от урана до свинца побывает в десяти клетках двух последних рядов таблицы Менделеева. Он испытывает *четырнадцать* последовательных превращений, образуя по дороге *восемнадцать* изотопов *десяти* различных элементов.

Некоторые атомы на этом пути даже распадаются сразу по двум направлениям.

При этом атом урана, превращаясь в конце концов в атом свинца, теряет восемь α-частиц и шесть

Рис. 4. Нужно очень внимательно проследить за путешествием потомков атома урана по периодической таблице. При каждом β-распаде у них меняется заряд, а при α-распаде — и масса. Что же определяет химические свойства получающегося ядра? Теперь не пользуются устаревшими названиями U-1, U-X_1 и т. п. Принято называть изотопы просто по названию элементов с добавлением массового числа. Вместо U-1 говорят U-238, вместо U-X_1 — Th-234. Составьте сами таблицу изотопов, образующихся при распаде урана-238.

β^--частиц. Этому соответствует потеря *десяти положительных зарядов*:

$$8\ (+2) + 6\ (-1) = 10.$$

При этом с химическим элементом происходят такие глубокие изменения его химической природы, которые соответствуют его перемещению из той клетки таблицы, где находится место урана, в ту, где должен быть свинец. *Десяти* потерянным положительным зарядам соответствует перемещение на *десять* последовательных клеток в таблице Менделеева.

Таким образом, химия радиоактивных элементов показала, что в основе периодического закона должен лежать другой фундамент: не атомный вес, а положительный заряд атомного ядра.

На помощь химикам пришла физика. Была предложена модель строения атома. Атом оказался сложным: вокруг положительно заряженного тяжелого ядра вращаются отрицательные электроны; их ровно столько, сколько положительных зарядов в ядре. Это и стало решающим для понимания основы периодического закона. Оказалось, что *заряд атомного ядра любого элемента численно равен порядковому номеру этого элемента в таблице Менделеева.* Прямое опытное доказательство этому нашел молодой талантливый английский физик Мозли, который в расцвете сил погиб во время первой мировой войны. Ему было около 24 лет, когда он сделал замечательное открытие. Изучая рентгеновские спектры элементов, Мозли нашел, что длина волны рентгеновского излучения зависит от места, которое занимает этот элемент в таблице Менделеева, от порядкового номера элемента. Измерив длину волны рентгеновского излучения элемента, можно было вычислить порядковый номер элемента. И этот номер действительно оказался равным числу положительных зарядов в ядре атома элемента.

Сложными, трудными путями развивается наука. Конечно, только знание, как построен атом, помогло физике понять огромное значение порядкового номера элемента — основы периодического закона. Но никогда не удалось бы узнать, как построен атом, если бы у исследователей, ученых не было яркого путеводного маяка — периодического закона. Без него было бы невозможно проникнуть внутрь атома и овладеть

Запомните, что теперь $1/12\,[^{12}_{6}C] = 1$

При составлении самого первого варианта периодической системы Д. И. Менделеев принимал атомную массу водорода равной единице и сравнивал с ней атомные массы всех других элементов.

На Международном съезде химиков в 1860 г. было решено принять водород за основу шкалы атомных масс (в то время употребляли термин «атомный вес»). Почти полстолетия самый легкий элемент водород занимал это почетное место. Только в 1906 г. химики перешли к кислородной шкале, за основу шкалы атомных масс была принята атомная масса кислорода — ее $^1/_{16}$ часть. Это, конечно, было гораздо удобнее, так как кислород образует соединения почти со всеми элементами.

Когда же было открыто, что в природе существуют три различных изотопа кислорода и что содержание их в природном кислороде непостоянно, физики установили для себя «физическую» шкалу атомных масс. Они условились принять за единицу для атомных масс $^1/_{16}$ массы атома наиболее распространенного легкого изотопа кислорода и атомную массу его считать равной точно 16. Это устраняло погрешность, происходящую из-за непостоянства изотопного состава кислорода разного происхождения.

При современной высокой точности измерений такое «двоевластие» стало приводить к очень многим недоразумениям и ошибкам. Кроме того, выяснилось, что изотоп ^{16}O не оправдывает возлагавшихся на него надежд и не может обеспечить необходимую точность. Он оказался неудобным эталоном для атомных масс.

И поэтому в 1958—1961 гг. ученые еще раз пересмотрели этот исключительно важный для всего естествознания вопрос: что должно быть положено в основу современной шкалы точных атомных масс? Из всех элементов только два могли претендовать на почетную роль основной константы химии и физики — фтор и углерод.

У фтора только один изотоп, и атомная масса элемента фтора — постоянная величина. Углерод имеет два изотопа, но зато его соединения с водородом очень удобны для непосредственного сравнения масс атомов различных изотопов почти всех элементов.

Поскольку и «фторная» и «углеродная» шкалы для атомных масс обладали каждая важными и ценными преимуществами, было решено провести всемирное голосование (опрос) ученых — химиков и физиков: какую шкалу они предпочитают? В этом всемирном опросе приняли участие и ученые нашей страны. Победил углерод. Было решено за основу новой единой шкалы атомных масс принять атом наиболее распространенного изотопа углерода ^{12}C и считать $1/12[^{12}_{6}C] = 1$.

его энергией. Без него стало бы немыслимым величайшее проявление могущества человеческого гения — создание новых искусственных элементов.

Если бы Менделеев не открыл периодический закон, несомненно, этот закон все равно был бы открыт. Но кто может сказать, на сколько лет задержалось бы развитие науки!

Естественная, как назвал ее Менделеев, система элементов не только требовала объяснить загадочную тайну периодичности, но она же и руководила наукой в поисках разгадки.

Новый смысл и значение атомного веса (атомной массы)

Менделеев считал, что химические свойства элементов зависят от их атомных весов. Это оказалось не так. Место в менделеевской таблице, а следовательно, и всю химию элемента определяет не его атомный вес (теперь мы должны называть по-новому — атомная масса), а атомный номер — заряд его ядра.

Значит ли это, что атомная масса оказалась науке больше ненужной и что теперь всё ее значение ограничивается очень полезной, но скромной ролью при расчетах состава вещества в процессе химического анализа?

Нет. Для физики значение атомной массы не только не уменьшилось, но, пожалуй, даже неизмеримо возросло, особенно с точки зрения практики. Масса атома в настоящее время стала основной величиной для всех расчетов ядерной энергетики и ядерной химии. Не зная точное значение атомной массы, абсолютно невозможно установить механизм ядерной реакции и рассчитать количество энергии.

Недоступный прямому восприятию, до сих пор еще никем не виденный атом ученые научились взвешивать с точностью в сотни и даже в тысячи раз большей, чем мы можем измерять любую другую величину в окружающем нас мире.

Вот с какой точностью измеряются теперь массы атомов:

^{1}H — 1,00782522
D^{2} — 2,01410219
^{4}He — 4,00260361
^{14}N — 14,00307438
^{16}O — 15,99491494

Чтобы почувствовать, зачем нужна такая огромная точность, попробуйте сами рассчитать из этих значений, сколько энергии получается на Солнце при

Джон Дальтон (1766—1844)

Английский химик и физик, член Лондонского королевского общества, иностранный почетный член Парижской академии наук. Дальтон развил атомистические воззрения в применении к химии. Из атомной гипотезы эмпирически (опытным путем) вывел один из основных законов химии — закон кратных отношений, дал первые определения атомных масс элементов. Изучая свойства газовых смесей и водяного пара, он установил закон парциальных давлений и закон растворимости газов. Дальтон впервые описал дефект зрения, получивший название «дальтонизм».

Первое применение спектрального анализа

Знаменитый буржуазный философ О. Конт пытался доказать ученым безнадежность попыток узнать, из чего состоят небесные тела — определить их химический состав.

Немецкие ученые Г. Р. Кирхгоф и Р. В. Бунзен, открывшие спектральный метод анализа, очень убедительно показали всю несостоятельность пессимистического утверждения философа-идеалиста. С помощью качественного спектрального анализа они определили для начала со сравнительно небольшого расстояния (в несколько десятков километров) состав праздничного фейерверка.

синтезе гелия из килограмма водорода. Стоит ли синтезировать его из дейтерия? Сколько энергии получается в звездах за счет «выгорания» гелия, в результате чего образуется углерод? Без точных значений атомных масс наука обойтись не может.

Периодический закон — закон строения атома

Тайна периодической системы элементов была разгадана, когда удалось понять сложнейшую структуру атома, строение его внешних электронных оболочек, законы движения электронов вокруг положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома.

Сотни и тысячи талантливых и самоотверженных ученых трудились, выясняя структуру атома. Они шли к ней разными путями и с разных сторон. Теоретики и экспериментаторы, физики и химики, открывая новые факты, отыскивая новые закономерности, всегда сопоставляли свои результаты и выводы с системой Менделеева.

Долгим и трудным путем шла наука к разгадке великой тайны периодического закона. Он воплотил в себе все необозримое многообразие бесконечного множества химических процессов и превращений в окружающем нас мире. Он внес ясность и порядок в химию, где до него царствовал хаос отрывочных и несвязанных сведений, фактов, наблюдений, накопленных многими поколениями химиков.

Почему элементы так послушно повинуются закону Менделеева? Почему существует таинственная правильная повторяемость свойств у химических элементов? Почему натрий похож на калий, а фтор сходен с хлором? Почему кислород и сера присоединяют по два атома водорода, а атомы углерода и кремния образуют соединения, в которых по четыре водородных атома? Почему химик, хорошо изучивший таблицу Менделеева, заранее скажет, какие соединения могут возникнуть при взаимодействии различных элементов?

Какова таинственная причина этих поистине удивительных закономерностей, управляющих течением всех химических реакций между всеми элементами, дающих бесчисленное множество соединений, из которых состоят все тела в окружающем нас мире, не только на нашей Земле, но и далеко за ее пределами, в безграничном космосе?

Много, очень много можно задать подобных вопросов. Ответ на них один. Все химические и физические свойства вещества определяются строением атомов. Великий закон, открытый Менделеевым, потому и есть всеобщий закон природы, что он выражает закон строения атома.

Атом сам рассказывает о своем устройстве

Атом... Само его имя «неделимый» отражает почтительную робость науки недавнего прошлого перед его непостижимостью. До сих пор его еще никто не видел. Никакие примеры и сравнения не могут дать правильное представление о его размерах.

Как же невообразимо сложно должен быть построен атом! Ведь его строение определяет бесконечное многообразие всего, что нас окружает. А ведь вокруг нас неисчерпаемый, безграничный мир, замечательный и прекрасный, полный света и красок.

И все, что мы видим на всем доступном нам протяжении безграничности мироздания,— все это состоит из немногих, аккуратно разложенных Менделеевым по клеткам его таблицы различных атомов.

Проникнуть в тайну того, как построен атом, помогло изучение спектров. Оказалось, что атом сам рассказывает о себе на удивительном и красочном языке — на языке спектральных линий испускаемого атомом света. Но ученые долго не могли понять его загадочный шифр. И в самом деле, попробуйте представить себя в положении человека, которому необходимо разгадать устройство механизма никогда им не виданного рояля, только слушая исполняемые на нем музыкальные произведения. Перед физиками же стояла задача неизмеримо труднее, но они сумели с ней справиться. Правда, для того чтобы понять шифр спектральных линий, им пришлось создать новую науку — квантовую механику.

Атом очень сложен. И до сих пор не все еще в его строении разгадано и изучено. Но основной закон строения атома оказался удивительно простым.

В атоме не может быть двух одинаковых электронов

А разве электроны могут быть разными? Быть может, электрон на Марсе отличается от электрона на Сириусе? Или электроны в атоме железа непохожи на электроны, вращающиеся в атомах водорода?

Нет. Физики совершенно точно знают, что все электроны, во всем мироздании, повсюду совершенно одинаковы.

Чем же тогда они различаются в атоме? Почему от этого зависят химические свойства элементов? Как периодический закон Менделеева связан со строением атома?

Эти вопросы очень трудны. Хотя они еще не все и не полностью решены наукой, но все же очень много тайн в строении атома уже разгадано. Хотите узнать их? Тогда прочтите внимательно, лучше с карандашом в руках, чтобы самому просчитать все оболочки и орбиты, следующую главу.

Как же все-таки может выглядеть атом?

Конечно, попытка «наглядно» изобразить атом на бумаге совершенно безнадежна. Всякий рисунок неподвижен, любое изображение статично. Атом — это вечный вихрь движения. Его нарисовать нельзя. Но графическая схема может все же помочь понять устройство атома, осмыслить результаты опыта и теоретического расчета.

Главные квантовые числа и электронные оболочки атома определяют энергию электронов

Атом сам на языке спектра рассказывает, что электроны, вращающиеся в нем вокруг ядра, различаются между собой. Они расположены на различных расстояниях от ядра, движутся по орбитам разной формы, у них различная скорость, а самое главное — различная энергия.

Опыт и квантовомеханический расчет показывают, что в каждом атоме может быть несколько групп электронов, различающихся между собой энергией, которые образуют вокруг атомного ядра несколько электронных оболочек.

На рисунке 5 они обозначены условно окружностями. Возле каждой из оболочек указано целое число: 1, 2, 3 до 7 — это ее главное квантовое число n. Физики привыкли обозначать главные квантовые числа буквами из середины алфавита по порядку: самая близкая к атомному ядру K-оболочка, а затем идут L-, M-, N-, O-, P- и Q-оболочки. От того, на какой из оболочек находится электрон, и зависит его энергия. Это очень важно. На ближайшей к ядру K-оболочке он обладает наименьшей энергией. Правильнее будет представлять себе электронные оболочки в виде концентрических сфер и считать их изображением энергетических уровней электронов в атоме.

Атом при переходе электрона с одного из внешних уровней на более глубокий излучает один фотон — квант лучистой энергии. Такие переходы электронов в атомах происходят всегда. Поэтому наши глаза и могут видеть.

Побочные квантовые числа определяют тип орбиты

К сожалению, эта простая картина атома не соответствует действительности. Выяснилось, что электроны, принадлежащие к одной и той же оболочке, могут двигаться по орбитам разного типа. Недавно еще считали, что их можно представить себе эллиптическими. Теперь думают, что такие попытки про-

Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907)

Великий русский ученый, почетный член многих иностранных академий и обществ. Величайшая заслуга Менделеева — открытие (1869) периодического закона химических элементов, являющегося естественнонаучной основой современного учения о веществе. На основе этого закона он предсказал существование и свойства нескольких химических элементов, открытых впоследствии (галлий, германий, скандий и др.). В классическом труде «Основы химии» Менделеев впервые систематически изложил всю неорганическую химию с точки зрения периодического закона. Он создал химическую, или гидратную, теорию растворов, основанную на представлении о химическом взаимодействии растворителя и растворенного вещества, открыл критическую температуру, нашел общее уравнение состояния газов. Менделеев известен важными исследованиями в самых различных областях науки и техники: метеорологии, метрологии, химической технологии, агрохимии. Менделеев— передовой общественный деятель своего времени — горячо боролся за распространение просвещения, за развитие производительных сил России.

Эта фотография Дмитрия Ивановича была сделана в то время, когда он работал над основами периодического закона. Одно из величайших открытий в истории мировой науки было сделано еще совсем молодым ученым. В 1869 г. Менделееву исполнилось всего тридцать пять лет.

Рис. 5. Схема всех возможных электронных оболочек в атоме. Диаметры их определяются энергией электрона и пропорциональны главному квантовому числу n.

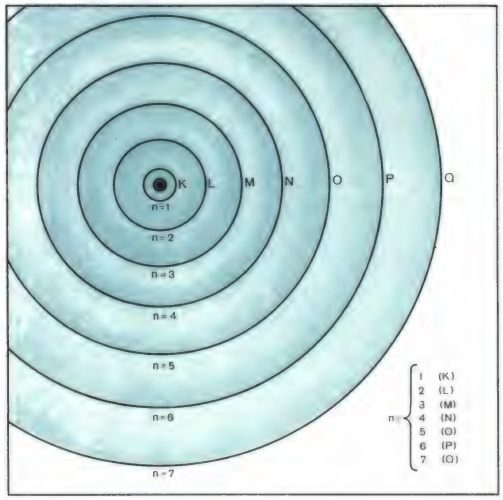
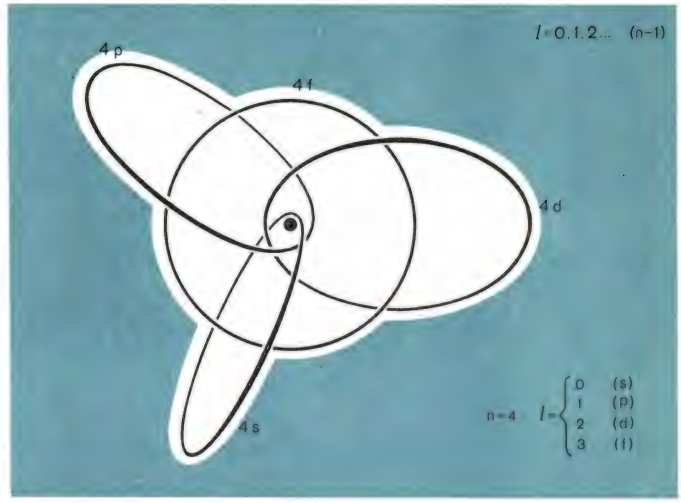


Рис. 6. Схема всех типов электронных орбит только одной N-оболочки атома. Вы сами можете легко начертить такую схему для любой другой оболочки. Только нужно иметь в виду, что отношение l полуосей в эллипсах должно быть равно $\frac{l+1}{n}$.



сто бесполезны и ненужны. Важно общее число различных типов электронных орбит в каждой оболочке, и очень важно, что все они разные. Физики даже говорят о существовании электронных подоболочек внутри каждой главной оболочки. Их число зависит от главного квантового числа n и равно ему. Каждый тип орбит, образующих подоболочку, характеризуется побочным квантовым числом l. Как и все квантовые числа, оно тоже целое число и может изменяться от 0 до $n - 1$.

На рисунке 6 вы видите попытку изобразить в качестве примера типовые орбиты всех подоболочек *только одной* N-оболочки любого атома.

Физики любят традиции и предпочитают сохранять старые буквенные обозначения для электронных подоболочек: буквы s, p, d и f. Это начальные буквы названий серий спектральных линий: резкая, главная, диффузная и фундаментальная. Они соответствуют побочным квантовым числам: 0, 1, 2, 3.

Однако и этого мало. Схема атома значительно сложнее. Каждая из электронных подоболочек состоит из одинаковых орбит, но число этих орбит в них различно.

Число орбит определяется значением магнитного квантового числа

Из того, как располагаются спектральные линии при излучении атомов в магнитных полях, было установлено, что в любой из главных электронных оболочек принадлежит к каждому типу строго определенное число электронных орбит. Оно зависит только от второго, побочного квантового числа и определяется третьим целым числом — «магнитным» квантовым числом m, у которого может быть $2l + 1$ значений: от $-l$ до $+l$.

Понять это не очень трудно: каждый электрон, вращаясь на орбите вокруг ядра, по существу, представляет собой один виток обмотки, по которому идет электрический ток. При этом возникает магнитное поле, поэтому каждую орбиту в атоме можно рассматривать как плоский магнитный листок. При наложении внешнего магнитного поля каждая электронная орбита будет с этим полем взаимодействовать и стремиться занять в атоме определенное положение (рис. 7). Энергия каждой из орбит изменится, и в соответствии с этим изменится и энергия фотонов.

Но и это еще не все.

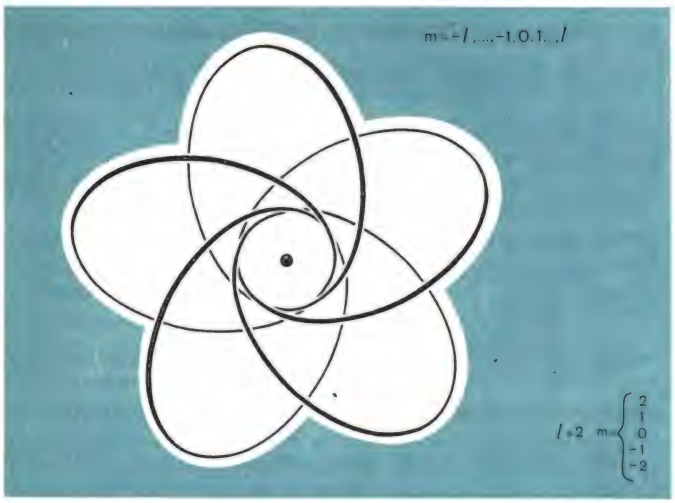
Число электронов на орбите зависит от спинового квантового числа

Поведение атомов в сильных неоднородных магнитных полях показало, что каждый электрон в атоме ведет себя как магнитик. А это указывает на то, что электрон вращается вокруг своей собственной оси, словно планета на орбите. Это свойство электрона получило образное название *спин* (в переводе с английского — «вращать»).

В отличие от вращения обычных тел в нашем микромире, где возможны любые скорости вращения, вращательное движение электрона постоянно и неизменно. Это его неотъемлемое свойство. Вращение электрона совершенно необычно: ни замедлить, ни ускорить, ни остановить его нельзя. Оно одинаково для всех электронов в мире.

Но хотя спин — общее свойство всех электронов, в нем причина различия между электронами в атоме.

Рис. 7. Орбит только одного типа d в одной только электронной оболочке может быть пять. Сообразите, в каких оболочках возможны такие орбиты. Правильнее представлять себе, что все они различно ориентированы в пространстве.



Два электрона, вращаясь на одной и той же орбите вокруг ядра, обладают одним и тем же спином, и все же они могут различаться направлением собственного вращения. При этом изменяется знак момента количества движения и знак спина (рис. 8).

Квантовый расчет приводит к двум возможным значениям спиновых квантовых чисел, присущих электрону на орбите: $s = +1/2$ и $s = -1/2$, других значений быть не может. Поэтому в атоме на каждой орбите могут вращаться либо два, либо только один электрон. Больше быть не может.

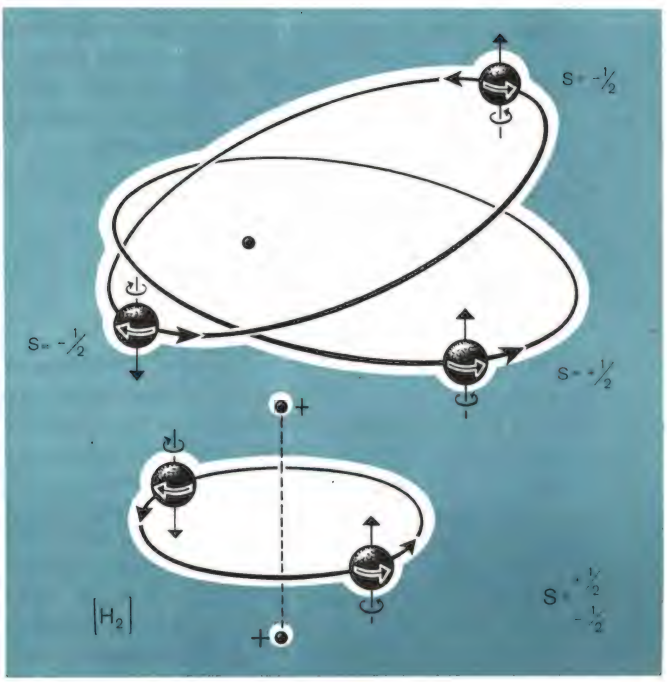
Не смешивайте, пожалуйста, буквенное обозначение второго квантового числа $l = 0$ с четвертым квантовым числом. И то и другое обозначают одной и той же буквой s. Наверное, просто потому, что физикам давно уже не хватает букв для их формул.

Эта теория, во многом прояснившая сложное строение атома и связавшая в единое целое его спектральные и химические свойства, основана на представлениях, впервые предложенных замечательным датским физиком Нильсом Бором.

Так на что же похож атом?

Графическое искусство бессильно изобразить строение атома. Пожалуй, единственная надежда остается на собственное воображение. Пусть те из читателей, у кого оно достаточно развито, предварительно подсчитают и даже вычертят орбиты всех типов для всех возможных электронных оболочек атома. А затем попытаются представить себе для наглядности

Рис. 8. На каждой отдельной орбите может быть либо только два «спаренных» электрона, либо один «неспаренный». Неспаренный электрон имеет большое значение для химической характеристики элемента. От него зависит образование молекул.



электроны в виде ярко светящихся шариков, которые кружатся каждый на своей орбите с невообразимо огромной скоростью. Тогда для глаза каждый электрон должен был бы превратиться в сверкающую кривую своей эллиптической орбиты. Но орбита его не может быть неподвижной: атом и неподвижность несовместимы. Сами электронные орбиты также меняют свое взаимное положение, в своем движении они описывают сложные и причудливые объемные фигуры, сливаясь в мерцающее фантастическое сияющее облако — в электронный вихрь.

В одних местах оно будет ярче: в них электронная плотность выше. В других — оно будет тусклым: вероятность пребывания в них электронов будет меньше. Но никаких отдельных электронов в этом электронном облаке различить нельзя.

Современная физика так и представляет себе атом в виде электронного облака со сложной структурой. Это облако сплошное и непрерывное. Где, в каких его точках в каждый момент находятся электроны — определить нельзя. Не только потому, что мы еще не обладаем средствами для такого наблюдения, но и потому, что электроны внутри атома проявляют свою двойственную природу — они ведут себя как волны.

Лучший друг и помощник фантазии и воображения — точная математика сумела рассчитать для простейших атомов вероятность нахождения электронов в каждой точке облака. Результат такого кван-

товомеханического расчета атома натрия изображен на рисунке 9. Если вообразить себе атомное ядро с диаметром в один сантиметр, увеличив его всего лишь в десять тысяч миллиардов раз, то диаметр электронного облака будет около километра.

Закон строения атома

Удивительна простота основного закона, к которому свелась первоначальная бесконечная сложность его строения. Вся прихотливость поведения электронов во внешней оболочке атома, управляющая всеми его свойствами, может быть выражена необычайно просто: *в атоме нет и не может быть двух одинаковых электронов*. Теперь смысл этого закона нам ясен. Все электроны в атоме должны иметь разный «набор» значений четырех квантовых чисел: n, l, m, s. Зная же общее число электронов в данном атоме, которое равно его порядковому номеру в менделеевской таблице, мы можем сами «строить» атом, можем сами рассчитывать структуру его внешней электронной оболочки — определять, сколько в ней электронов и какие они в ней. Этот закон известен в науке как принцип Паули (по имени швейцарского физика-теоретика).

Формула атома

Структуру внешней оболочки атома принято выражать своеобразной формулой. На основании только одних теоретических квантовых расчетов мы можем написать ее для любого легкого атома, вплоть до аргона. Для остальных атомов пока еще не хватает теории, и приходится привлекать на помощь опытные данные.

Формулу атома по странной традиции принято писать в несколько необычной форме. Но к ней нетрудно привыкнуть. Главное квантовое число физики условились записывать соответствующей цифрой, а побочное — буквой; число же электронов — помечать сверху справа. В атоме водорода только один электрон, поэтому у его формулы простой вид: $\boxed{1s}$.

У гелия два электрона. Согласно правилам квантования, в одной и той же оболочке не может быть больше двух s-электронов. Поэтому формулой гелия $\boxed{1s^2}$ завершается первый период. Третий электрон может занять только следующий уровень с главным квантовым числом $n = 2$, в котором также есть s-электроны. Следовательно, формула электронной оболочки для атома лития будет $\boxed{1s^2\,2s}$, а для бериллия — $\boxed{1s^2 2s^2}$.

Все s-электроны исчерпаны, поэтому пятый элемент — бор должен иметь формулу $\boxed{1s^2 2s^2 2p}$.

Тому из читателей, кто хочет в будущем стать хорошим химиком, равно и тем, кто собирается посвятить себя атомной физике или кому по душе свет и его таинственные спектры, очень советуем еще раз перечитать предыдущие разделы о квантовых законах строения электронных оболочек атома и самим составить формулы для всех атомов трех первых периодов.

Для проверки приводим строение электронной оболочки натрия, у которого его одиннадцать электронов распределены в соответствии с формулой $\boxed{1s^2 2s^2 2p^6 3s}$. Думаем, что и у вас получится такой же результат.

Причина периодичности в свойствах химических элементов

Наверное, у многих читателей этой статьи уже возникло совершенно законное недоумение. Ведь все, что было рассказано о законах квантовых чисел, управляющих постройкой атомов,— это результат приложения квантовой механики к изучению спектров различных элементов. В этом разделе не говорилось ни о химических свойствах, ни о законе периодичности. Так какое же отношение имеют эти удивительные сочетания простых чисел, объяснившие сложность и запутанность спектральных линий, к химии, к великому периодическому закону?

В природе существует глубокая внутренняя связь даже между самыми несходными и далекими явлениями и процессами. Свет и химия не лежат в ней на разных полках. Оба эти глубоко различные начала тесно связаны. Исследования спектров помогли

выяснить строение атома, а знание структуры электронной внешней оболочки помогло понять причину периодичности в изменении свойств химических элементов. Эта причина заложена в периодичности строения электронных оболочек атомов. От этого и зависят все химические свойства элементов.

В самом деле, к чему привели нас квантовые числа электронов, управляющие их поведением в атоме? Ведь они получены на основании теории, созданной для объяснения спектров, совершенно независимо от исследования химических свойств элементов.

1. Доказано, что электронная внешняя оболочка атомов имеет периодическое строение. По мере увеличения заряда атомных ядер электроны начинают периодически заполнять новые слои электронной оболочки — размещаются на новых энергетических уровнях.

2. Доказано, что при этом в атоме должны повторяться одинаковые по строению и по числу электронов подгруппы в каждой последующей оболочке.

3. Сходство элементов определяется одинаковым строением наружного слоя электронной оболочки в их атомах.

Литий $1s^22s$ потому и стоит в одной группе менделеевской таблицы вместе с натрием $1s^22s^22p^63s$, что у обоих на внешней орбите по одному s-электрону.

Пожалуйста, не сочтите, что на этом теория строения атома завершена и теперь все совершенно ясно: стоит только без ошибки рассчитать по всем правилам квантовой механики и написать формулу атома — и сразу перед опытным и знающим химиком раскроются все необозримые тайны химических свойств любого элемента. Это не так. Никакая теория не может до конца охватить неисчерпаемое многообразие действительности. Как бы глубоко мы ни проникли в атомный микромир, все равно будем стоять только на пороге неведомого.

Теория строения атомных оболочек дала химии очень много. Мы теперь точно знаем, *какие* электроны могут быть в атоме, точно знаем, *сколько* их может быть в каждой из его оболочек. Но мы еще не знаем точно, в *каком порядке* они должны заполнять орбиты по мере роста порядкового номера элемента.

В первых трех периодах заполнение идет просто в порядке последовательности. Почему это так, мы не знаем. А чтобы определить строение атома, приходится привлекать на помощь опытные данные, полученные при изучении тонкой структуры спектральных линий и химического поведения элемента.

Нильс Хенрик Давид Бор (1885—1962)

Датский физик, член Датской академии наук и многих академий мира, в том числе иностранный член Академии наук СССР, лауреат Нобелевской премии (1922). Бор — один из создателей современной квантовой физики. В 1913 г., используя планетарную модель строения атома Резерфорда и квантовую теорию Планка, Бор дал первоначальную формулировку квантовой теории атома, которая объяснила особенности спектров атомов водорода. При этом он предложил смелую гипотезу о неприменимости законов классической электродинамики в атоме. Очень плодотворным оказался выдвинутый Бором в 1913 г. принцип соответствия между классическими и квантовыми представлениями, позволивший сделать количественные выводы о спектральных частотах и других свойствах атомов и молекул. В последующие годы Бор активно участвовал в разработке теории атомного ядра. В 1939 г. он объяснил деление ядер урана.

Теоретический расчет, выраженный в несложных правилах комбинаторики простых чисел, очень многое сделал ясным в периодическом законе.

Нельзя не поражаться гению Менделеева. Он сумел уловить великое единство в необъятном хаосе,

в беспорядке накопленных до него химиками разрозненных фактов и сведений. Он сумел установить естественный закон химических элементов в то время, когда еще почти ничего не было известно о строении вещества. Менделеевская таблица на долгие годы определила все развитие науки о веществе. Но и теперь, более чем через 100 лет после открытия периодического закона, пока еще даже квантовая теория не может в ней объяснить все полностью.

Строение атома и свойства вещества

Все свойства вещества, конечно, полностью определяются строением атомов. Радиоактивность, способность к ядерным превращениям зависят от природы и строения атомного ядра. Оптические свойства элемента, его атомные спектры определяются строением электронной оболочки атома, совокупностью всех его электронов.

Химическое поведение элемента зависит от его наружных электронов. Особенно важную роль в химии каждого элемента играют его самые внешние электроны. Чаще всего это *s*- и *p*-электроны, иногда *d*-электроны.

Строение атома и химия

В атоме первого элемента таблицы Менделеева — водорода только один *s*-электрон. Немногие вещества обладают такой химической активностью, как атомарный водород. Именно благодаря примеси свободных атомов водород в момент выделения из связывающих его соединений обладает удивительной способностью к самым разнообразным химическим превращениям.

Сосед водорода по таблице — гелий. В его атоме на одной орбите два *s*-электрона. Обратите внимание на то, что оба эти электрона, образующие гелиевую орбиту,— *спаренные*. Они вращаются в разные стороны, каждый вокруг своей оси. Два таких электрона и придают несокрушимую прочность атому гелия.

Два атома водорода соединяются в одну молекулу, и при этом в очень прочную молекулу. За счет пары электронов эти атомы образуют гелиеподобную, общую для обоих атомов орбиту (рис. 10).

Гелий, как и другие благородные газы, в атомах которых все электроны спаренные, почти не способен образовывать молекулы. В свободном газообразном состоянии он существует в виде отдельных атомов.

Запомните эту очень важную и удивительную способность двух *s*-электронов образовывать общую очень прочную орбиту. Это может происходить, даже если оба электрона принадлежат двум разным атомам. Такое свойство электронов имеет особенно большое значение для химии. Именно благодаря этому и могут возникать очень прочные связи между атомами, могут образовываться и существовать молекулы. Химики такую химическую связь называют *гомеополярной*.

Насколько важны для химии внешние электроны атома, можно судить хотя бы по тому, что именно их число и определяет валентность элемента. У лития, натрия, калия — одновалентных элементов — на внешней орбите атомов по одному *s*-электрону. Бериллий, магний, кальций потому и двухвалентны, что на их внешних орбитах по два *s*-электрона.

Элементы неон, аргон, криптон, ксенон обладают одинаково построенными наружными электронными оболочками из восьми электронов s^2p^6. Эти оболочки очень прочны. Атомы благородных газов, стоящих в нулевой группе периодической таблицы, держат свои электроны очень крепко.

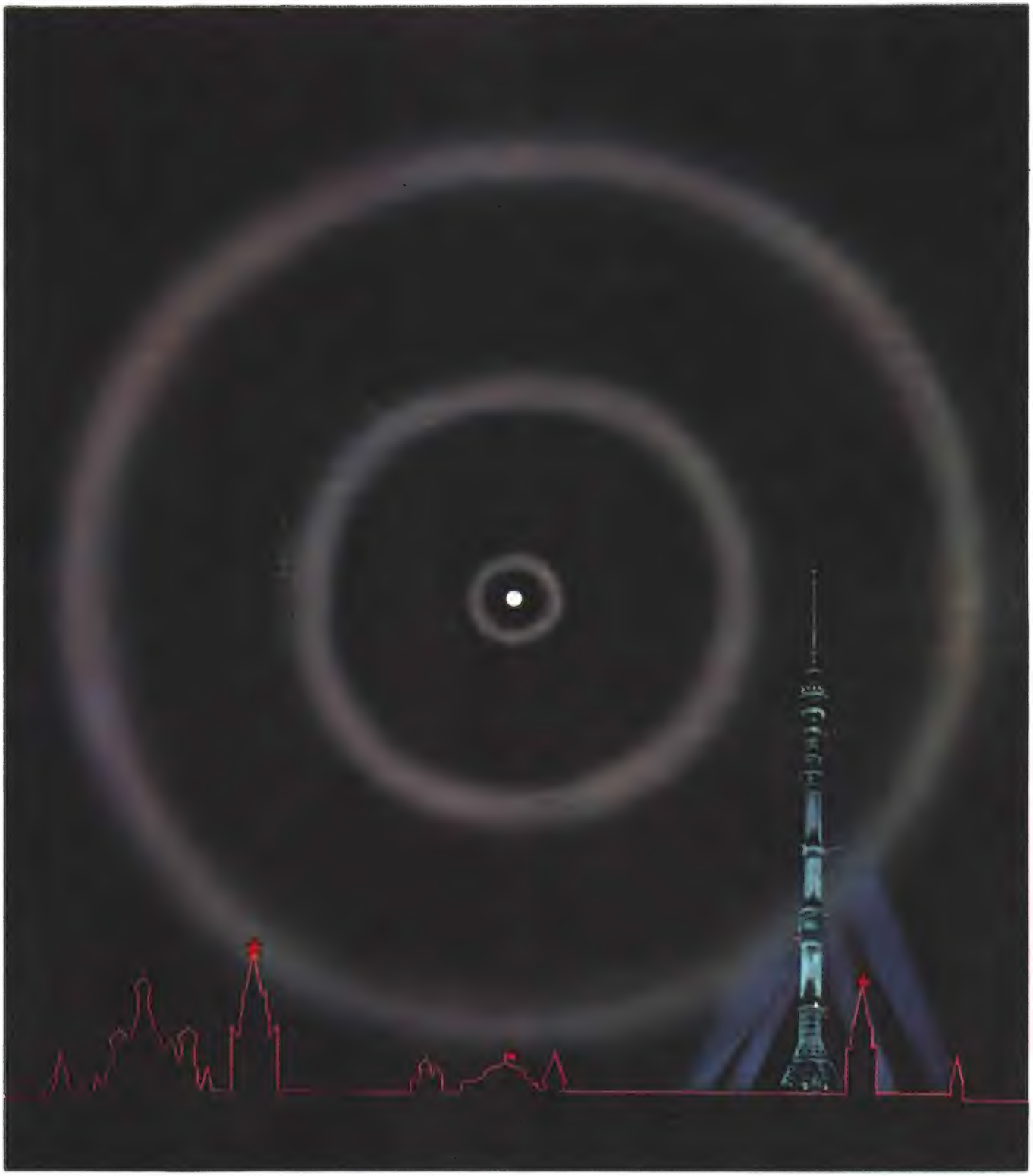
Если атомы металлов калия, кальция, алюминия и других элементов, стоящих в первых группах таблицы, потеряют свои слабосвязанные наружные электроны, то их электронные оболочки станут такими же, как оболочки атомов ближайших благородных газов, стоящих перед ними в таблице.

У элементов, например, седьмой группы во внешней электронной оболочке по семь электронов. Если такой атом захватит еще один электрон, то его наружная электронная оболочка станет такой же, как у ближайшего, следующего за ним в таблице элемента нулевой группы.

При химических реакциях происходит перераспределение наружных электронов: электронные оболочки стремятся стать такими же, как у ближайших благородных газов. Тот из атомов, который отдает электрон, становится заряженным положительно, атом же, захвативший электрон, будет заряжен отрицательно. Разноименно заряженные атомы начнут благодаря силам электростатического взаимодействия притягиваться друг к другу. Так возникает еще один тип химической связи. Химики ее называют *гетерополярной*.

Таким образом, силы, связывающие атомы в молекулы, возникают в результате взаимодействия по-

Рис. 9. Вот так выглядел бы атом натрия, если представить себе, что его ядро увеличилось бы до размера в один сантиметр, а электроны стали бы ярко светящимися шариками.



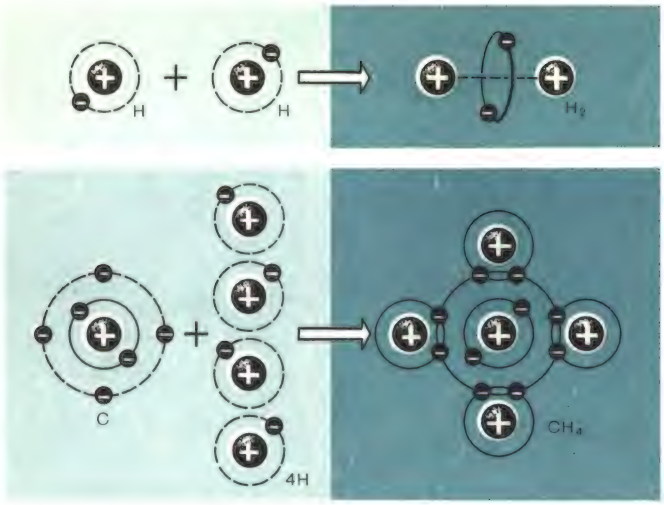


Рис. 10. *Вверху* — схема образования молекулы водорода из двух водородных атомов. *Внизу* — схема образования молекулы газа метана из атома углерода и четырех атомов водорода.

ложительных ядер и отрицательных электронных оболочек атомов. Это взаимодействие всегда стремится так перестроить внешнюю электронную оболочку, чтобы она стала наиболее прочной, наиболее устойчивой, такой же, как у ближайшего элемента нулевой группы.

Рассмотрите внимательно простую химическую реакцию, записанную в не совсем обычной для школьного учебника форме:

$$[1s^2 2s^2 2p^6 3s] + [1s^2 2s^2 2p^5] = [1s^2 2s^2 2p^6]^+ \cdot [1s^2 2s^2 2p^6]^-$$
$$\text{Na} \quad + \quad \text{F} \quad = \quad \text{NaF}$$

и сравните результат с формулой электронной оболочки благородного газа неона $[1s^2 2s^2 2p^6]$.

Почему водород стоит одновременно в двух клетках таблицы Менделеева?

Свойства водорода таковы, что ему трудно подобрать одно вполне определенное место. Чаще всего его помещают в первую группу, зачисляют в родственники к щелочным металлам. Как и у них, у водорода один электрон на внешней оболочке, и он может проявлять положительную валентность, равную единице. И наконец, он способен вытеснить некоторые металлы из их солей. Но этим и ограничиваются свойства, родственные прочим элементам первой группы. Водород — неметалл, газ, а все остальные — типичные металлические элементы.

Зато у водорода много общего с галогенами — элементами седьмой группы. Как и у галогенов, молекулы водорода состоят из двух атомов. И галогены и водород — типичные неметаллы. Подобно галогенам, водород может проявлять отрицательную валентность, вступая в соединения с металлами и образуя своеобразные вещества — металлические гидриды. Но и этого сходства слишком мало, чтобы считать водород кровным братом галогенов.

Поэтому ученые и считают, что водород объединяет в себе черты элементов и первой и седьмой групп. Такая «двуликость» водорода объясняется строением его атома. Любой элемент, отдавая валентные электроны, сохраняет в неприкосновенности одну или несколько предыдущих оболочек. Водород, расставаясь с единственным валентным электроном, предстает перед нами в виде «голого» атомного ядра — протона. Поэтому химия водорода — это до какой-то степени единственная в своем роде химия элементарной частицы.

Самая удивительная группа таблицы Менделеева

Назовем ее сразу: это восьмая группа периодической системы. Входящие в нее элементы группируются по три в каждом большом периоде таблицы. Эти группировки называются *триадами*.

Элементы триад очень сходны между собой. Даже названия некоторых из них объясняются именно таким сходством. В средние века рудокопы находили иногда загадочные руды, похожие на железные, из которых никак не удавалось выплавить железо. Озадаченные рудокопы наивно думали, что над ними зло шутят горные духи — карлики кобольды и старый черт Ник. Отсюда и имена двух элементов первой триады: кобальт и никель.

Элементы двух других триад еще более похожи друг на друга; их даже объединяют общим названием: платиновые металлы. И все они встречаются в природе почти исключительно в самородном металлическом состоянии.

Восьмая группа не делится на главную и побочную, как другие группы таблицы Менделеева. Казалось бы, максимальная валентность элементов в триадах должна равняться восьми. Но таких «высот» достигают лишь рутений и осмий: им удается образовывать окислы RuO_4 и OsO_4. Получается, что номер группы носит чисто формальный характер. И некоторые химики не без основания указывали на это как на слабое место периодической системы.

У железа, кобальта и никеля происходит достройка предыдущей электронной оболочки (M-оболочки) d-электронами. И эта оболочка уже близка к завершению. Точно такую же картину мы видим и в атомах платиновых металлов.

А раз предыдущая оболочка вот-вот должна заполниться до нужной емкости, то атому из восьмой группы становится невыгодным отдавать с нее много

электронов. Поэтому восьмивалентное состояние — большая редкость среди элементов триад.

Платиновые металлы вообще неохотно позволяют вмешиваться в свою структуру даже самым яростным химическим агрессорам, и их трудно вовлечь в соединение. Потому-то их вместе с золотом называют благородными металлами.

Благородные газы могут вступать в химические соединения

Ни из периодического закона, ни из теории строения атома не следует, что элементы нулевой группы — благородные газы, эти химические «ленивцы» — вообще не способны вступать в реакции химического взаимодействия с другими элементами. Теория только указывает на исключительную прочность внешних электронных оболочек у этих «безразличных ко всему на свете» элементов: гелия, неона, аргона, криптона, ксенона и радона. Из теории вытекает лишь их высокая химическая инертность.

Это полностью соответствует их свойствам. В обычных условиях они ни с чем не соединяются. В природе они находятся в свободном состоянии. Они даже не способны образовать свою собственную молекулу. Все это одноатомные газы. Их нормальное состояние — нулевая валентность.

Когда в 1900 г. Д. И. Менделеев и У. Рамзай встретились в Лондоне, оба ученых пришли к убеждению, что к периодической системе нужно для этих бездеятельных элементов добавить еще одну, «нулевую» группу. Такое положение в менделеевской таблице для этих элементов до сих пор общепринято. Оно хорошо характеризует их свойства.

Однако химики никогда не теряли надежду преодолеть химическую «лень» благородных газов и заставить их вступать в химические превращения. Это оказалось чрезвычайно трудной задачей. Решение ее потребовало более 60 лет напряженной работы.

Попытки получить химические соединения инертных газов были предприняты сразу после открытия аргона. В 1896 г., всего через два года после открытия аргона, было получено при очень высоком давлении первое соединение аргона с водой: $Ar \cdot H_2O$. Но чтобы получить такие же соединения для криптона и ксенона, химикам пришлось работать еще почти 30 лет (до 1925 г.). Всего более 40 лет затратили химики на неудачные попытки заставить благородные газы вступить в реакцию еще с каким-либо веществом помимо воды.

Первые успешные результаты в преодолении их бездеятельности получил советский химик Б. А. Никитин. В 1940 г. ему удалось заставить благородные газы вступать в реакцию с некоторыми органическими соединениями. И всё же полученные им соединения нельзя было считать истинно химическими. Это были соединения без химической связи. В них атом инертного газа находился внутри органической молекулы, как в клетке, и не мог ее покинуть. Такие соединения называются теперь *клатратными соединениями*.

Непрерывные неудачи создали общепринятое мнение о том, что благородные газы вообще не способны участвовать в химических реакциях. И даже школьники во всем мире так это и учили по своим учебникам. Но упорная борьба продолжалась. Развивая теорию химической связи, ученые-теоретики смогли с уверенностью предсказать возможность взаимодействия некоторых инертных газов с фтором.

И наконец, в 1962 г. был достигнут замечательный успех. Канадскому химику Бартлетту удалось получить первое настоящее соединение ксенона с платиной и фтором — $XePtF_6$. Вскоре были получены соединения XeF_6, XeF_4 и XeF_2. Это твердые кристаллические устойчивые вещества белого цвета. Были получены и соединения криптона и фтора, но они стойки только при температуре жидкого азота. Наконец, удалось получить соединение ксенона с кислородом. Оно оказалось сильно взрывчатым.

Теперь можно считать, что химики преодолели химическую инертность элементов нулевой группы таблицы Менделеева и положили начало новому интересному разделу химии.

Сколько редкоземельных элементов в одной клетке таблицы Менделеева?

В этом простом и, казалось бы, ясном вопросе отражается почти вековая история ошибок и заблуждений. Для самого Менделеева такой вопрос был просто неуместен: одну клетку в таблице может занимать только один элемент.

Много известных химиков, среди них и сам Менделеев, долго бились над размещением редкоземельных элементов в периодической системе: пытались поместить, например, церий в четвертой группе, празеодим в пятой, для неодима искали место в шестой.

Но эти необыкновенные элементы бесцеремонно нарушали самую основу периодического закона. При

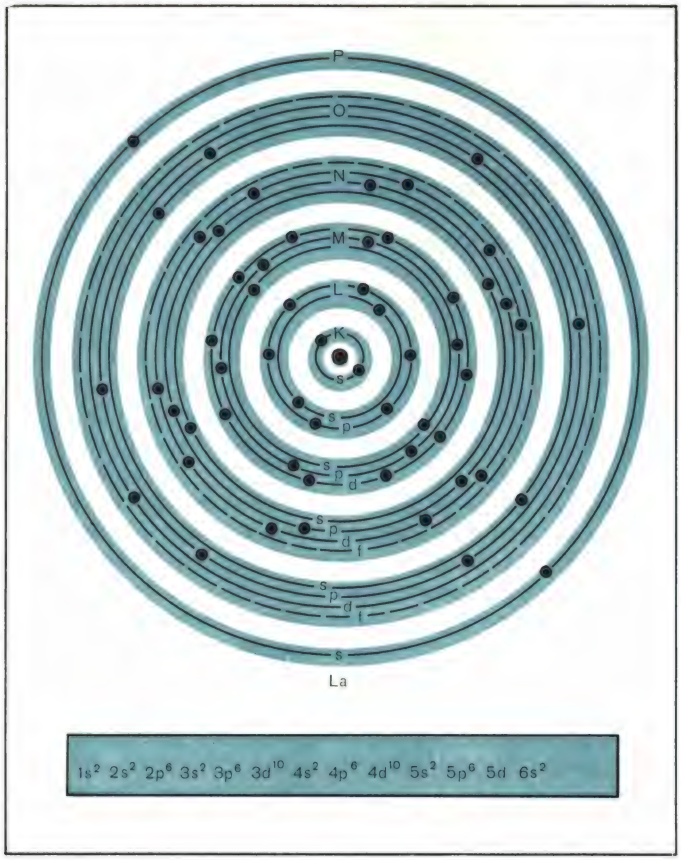


Рис. 11. Будущему химику рекомендуем внимательно изучить эту упрощенную схему довольно сложного атома. Это атом лантана. На первый взгляд у него очень сложная формула, но это только так кажется. Обратите внимание: на всех энергетических уровнях обязательно по 2 *s*-электрона, по 6 *p*-электронов. В оболочках *M* и *N* кроме этих электронов есть еще по 10 *d*-электронов. Заметьте, что подуровень, где должны быть *f*-электроны, пустой, на нем ни одного электрона нет. Затем у лантана только один 5*d*-электрон и, наконец, еще два 6*s*-электрона. Возможный подуровень 4*f* тоже пустой. Всего у лантана, как это и должно быть, 57 электронов. Он занимает клетку 57. Это первый элемент из семейства редких земель. У последующих элементов по мере увеличения заряда атомного ядра электроны будут постепенно заполнять свободный, глубоко скрытый уровень 4*f*, на котором может поместиться 14 электронов. Пустой подуровень 5*f* начнет заполняться только у трансурановых элементов. Пока еще неизвестно точно, как построен последний, седьмой период менделеевской таблицы.

любых попытках разместить их в таблице периодическая повторяемость свойств не соблюдалась. В главных и побочных подгруппах должны быть сходные элементы. Церий же не имел ничего общего с цирконием, празеодим с ниобием, а неодим совершенно не был похож на молибден.

Зато, по мере того как изучались их химические свойства, становилось все более ясным, что эти элементы сходны друг с другом, как братья-близнецы. Они настолько химически подобны, что химику их и различить и разделить чрезвычайно трудно. Но все они, бесспорно, разные элементы. В этом химики не сомневались.

Друг Менделеева, чешский химик Браунер, предложил самое простое решение: поместить все *эти элементы в одну* клетку таблицы. Менделееву пришлось с этим согласиться. Но, по существу, это только увеличило принципиальную трудность проблемы, не разрешив ее.

Если *одно* место могут занимать *несколько различных* элементов, то, во-первых, нарушается основной принцип периодической системы и, во-вторых, становится совершенно невозможным предвидеть и предсказать, сколько же их можно найти в природе, сколько их вообще может существовать. Химики же всего мира разыскивали их очень усердно и более чем успешно. За короткий период, примерно за 30 лет, было «открыто» почти *сто* (!) редкоземельных элементов. Все попытки найти разумное решение проблемы редких земель были безуспешными. Она казалась неразрешимой.

Только квантовая теория строения атома помогла решить окончательно эту большую загадку химии. Детальное изучение спектральных характеристик у редкоземельных элементов показало, что строение их атомов очень своеобразно. Все они «внешне» совершенно сходны между собой. Их наружные электронные оболочки, у всех без исключения, построены совершенно одинаково (рис. 11).

У всех у них в самой наружной *P*-оболочке по два *s*-электрона, поэтому все они металлы. Глубже расположенный *d*-подуровень, принадлежащий к *O*-оболочке, в атомах редкоземельных элементов еще не заполнен — в нем всего лишь один электрон, который тоже может принимать участие в химических превращениях. Поэтому редкоземельные элементы преимущественно трехвалентны. Но это разные элементы, заряды их атомов различны, и потому у них должно быть различным и число электронов. Определение порядкового номера установило, сколько же всего этих элементов, а изучение спектров помогло выяснить их строение. Оказалось, что они отличаются друг от друга числом *f*-электронов на оставшейся незаполненной, глубоко скрытой в недрах атома *N*-оболочке. Эти электроны защищены снаружи «броней» устойчивой оболочки $5s^2\ 5p^6$, той самой, которая обеспечивает благородному газу ксенону (элемент 54) его свойства. Эти электроны почти совершенно блокированы и не могут проявлять себя в химических свойствах.

Правда, не все ученые с этим согласны. Многие считают, что строение редкоземельных элементов значительно сложнее: 5*d*-электроны, утверждают они, есть только у лантана, гадолиния и лютеция, у остальных лантаноидов на 4*f*-уровне на один элек-

трон больше. Изучение лантаноидов еще не завершено до конца.

Зная теперь законы построения внешних электронных оболочек атома, любой из вас, будущих химиков, сможет сам решить проблему, над которой химики прошлого бились многие десятилетия: сколько редкоземельных элементов существует в природе?

Очевидно, ровно столько, сколько их соответствует постепенному заполнению всех орбит с этими электронами. Обозначение f заменяет квантовое число $l = 3$. Мы уже знаем, что таких орбит может быть $2 \cdot 3 + 1 = 7$. А на каждой может быть не больше двух электронов. Следовательно, таких элементов в природе может быть *четырнадцать*. Всего же в природе должно существовать ровно *пятнадцать* элементов-близнецов, считая и лантан, свойствами близкий к лантаноидам. Столько их в действительности и оказалось, начиная с 57-го — лантана до 71-го — лютеция. Правда, в природе все-таки оказался пробел: 61-й элемент нашли совсем недавно. Сперва пришлось ученым самим его изготовить. Его назвали прометием.

Итак, можно ли сказать, что в одной клетке периодической таблицы размещаются пятнадцать элементов? Этот вопрос обсуждается часто и в наши дни. Периодический закон Менделеева — это всеобщий закон природы. В естественной системе элементов каждый элемент занимает одно место, и, следовательно, в таблице каждый элемент — одну клетку. Менделеев придал своей таблице самую простую и удобную форму. Изображать же ее можно по-разному. Можно просто помнить, что одна клетка между барием и гафнием условно заменяет сразу 15 клеток. Но можно менделеевскую таблицу начертить так, чтобы все длинные периоды оказались развернутыми. Периодический закон от этого не изменится.

Как были предсказаны свойства элемента № 72

Если теория объясняет — делает ясным то, что долго было непонятным и загадочным, это, конечно, ее несомненное достоинство. Впрочем, пожалуй, иначе ее и нельзя было бы назвать теорией. Но главное, на чем испытывается истинность теоретических представлений,— это способность теории предвидеть, предсказывать неизвестное.

Величайшим историческим примером этого должна быть, конечно, признана сама теория периодичности свойств химических элементов. В ней, как в зародыше, были заложены все великие открытия науки о веществе и его строении, достигнутые человечеством за последующее столетие.

Одним из больших достижений физики может быть названа и теория строения атома и его электронных оболочек. Созданная на основе менделеевской таблицы, эта теория сделала ясным очень многое из загадочного и непонятного в свойствах вещества. Но этого мало. Истинность наших теоретических представлений о строении атома наиболее полно раскрывается в том, что на их основе ученым удалось предсказать многое, чего наука еще не знала. В качестве примера можно указать на очень интересную историю элемента № 72.

Его существование было предсказано Менделеевым еще в 1869 г. Но до 1922 г., несмотря на многочисленные поиски, отыскать его в природе химики не могли. Как это ни странно, оказалось, что поискам мешали соседи по таблице Менделеева — редкоземельные элементы. До создания теории строения атома никто не знал, на каком из элементов должна заканчиваться группа редких земель. Многие химики, считая, что к ним должен относиться и элемент № 72, безуспешно пытались его искать в природе там, где его быть не может.

После того как теория строения атома показала, что группа редкоземельных элементов должна заканчиваться на элементе № 71 — лютеции, стало очевидным, что 72-й элемент не может относиться к лантаноидам и должен быть похожим на цирконий. Это конкретное предсказание свойств еще не найденного элемента вытекало из квантовой теории строения атома. Оно и помогло отыскать в природе неуловимый до того элемент № 72. В 1922 г. он был обнаружен в циркониевых рудах и назван гафнием. Это открытие сделали голландский физик Д. Костер и венгерский химик Д. Хевеши.

Элементы, созданные человеком, также подчиняются Великому закону

Четыре места в периодической таблице оставались пустыми особенно долго. Это были клетки № 43, 61, 85 и 87. Из четырех элементов, которые должны были бы занять эти места, три были уже давно предсказаны Менделеевым: экамарганец — 43, экаиод — 85 и экацезий — 87. Четвертый — № 61 — должен был оказаться редкоземельным элементом.

Эти четыре элемента были неуловимы. Усилия ученых всех стран мира, направленные на их поиски

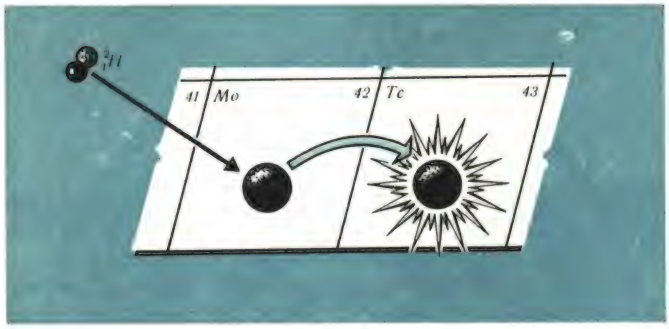


Рис. 12.

в природе, оставались безуспешными. С помощью периодического закона давно уже были заполнены все остальные места в таблице Менделеева — от водорода до урана.

Не один раз в научных журналах появлялись сообщения об открытии этих четырех элементов. Экамарганец «открывали» в Японии, где ему дали имя «нипонний», в Германии — назвали «мазурий». Элемент № 61 «открывали» в разных странах по крайней мере трижды, он получал имена «иллиний», «флоренций», «циклоний». Экаиод «находили» в природе также неоднократно. Ему давали имена «алабамий», «гельвеций». Экацезий в свою очередь получал названия «виргиний», «молдавий». Некоторые из этих названий попадали в периодические таблицы различных справочников и даже проникли в школьные учебники. Но все эти открытия не подтвердились: каждый раз точная проверка показывала, что была допущена ошибка и случайные ничтожные примеси были приняты за новый элемент.

Долгие и трудные поиски привели, наконец, к открытию в природе одного из неуловимых элементов. Оказалось, что экацезий, который должен занимать в периодической таблице 87-е место, возникает в цепочке распада природного и радиоактивного изотопа — урана-235. Это короткоживущий радиоактивный элемент. У него нет стабильных изотопов. Он получил имя франций.

Элементы № 43, 61 и 85 оставались неуловимыми. В природе их никак не удавалось найти, хотя ученые уже владели могучим методом, безошибочно указывающим путь для поиска новых элементов,— периодическим законом. Все химические свойства неизвестного элемента благодаря этому закону были известны ученым заранее.

Так почему же были безуспешны поиски этих трех элементов в природе? Может быть, не для всех элементов оказался справедливым закон Менделеева и поиски их в природе направлялись по неверному пути?

Изучая свойства атомных ядер, физики доказали: у элементов с атомными номерами 43, 61, 85 и 87 не могут существовать стабильные изотопы. Они могут быть только радиоактивными, с короткими периодами полураспада и должны быстро исчезать. Поэтому все эти элементы были созданы человеком искусственно.

Пути для создания новых элементов были указаны периодическим законом. Попробуем с его помощью сами наметить путь синтеза экамарганца. Этот элемент № 43 был первым элементом, созданным человеком искусственно.

Мы знаем, что химические свойства элемента определяются его электронной оболочкой, а она зависит от заряда атомного ядра. В ядре элемента № 43 должно быть 43 положительных заряда, и вокруг ядра должны вращаться 43 электрона. Как же можно создать элемент с 43 зарядами в атомном ядре? Как можно доказать, что такой элемент создан?

Давайте рассмотрим внимательно, какие соседи в периодической таблице у пустого места, предназначенного для элемента № 43. Оно находится почти в середине пятого периода. Этот период длинный, так же как четвертый и шестой периоды. На соответствующих местах в четвертом периоде стоит марганец, а в шестом — рений. Поэтому химические свойства 43-го элемента должны быть похожи на свойства марганца и рения. Недаром Д. И. Менделеев, предсказавший этот элемент, назвал его экамарганцем. Слева от 43-го места находится молибден, занимающий клетку 42, справа, в 44-й,— рутений. Следовательно, можно предположить: чтобы создать элемент № 43, нужно повысить число зарядов в ядре атома, имеющего 42 заряда, еще на один элементарный заряд. Поэтому исходя из указаний периодического закона при создании нового элемента № 43 нужно взять в качестве исходного сырья молибден. У него в ядре как раз 42 заряда. Одним положительным зарядом обладает самый легкий элемент — водород. Следовательно, можно ожидать, что элемент № 43 может быть получен в результате ядерной реакции между молибденом и водородом (рис. 12).

Свойства элемента № 43 должны быть сходными с химическими свойствами марганца и рения, и, для того чтобы обнаружить и доказать образование этого элемента, нужно воспользоваться химическими реакциями, аналогичными тем, с помощью которых химики определяют присутствие малых количеств марганца и рения.

Вот каким образом периодическая таблица дает возможность наметить путь для создания искусственного элемента, если, конечно, химический элемент, созданный заново человеком, будет также подчиняться закону Менделеева.

Точно таким же путем, который мы только что наметили, путем, полностью указанным периодическим законом Менделеева, и был создан в 1937 г. первый искусственный химический элемент. Он получил знаменательное имя *технеций* — первый эле-

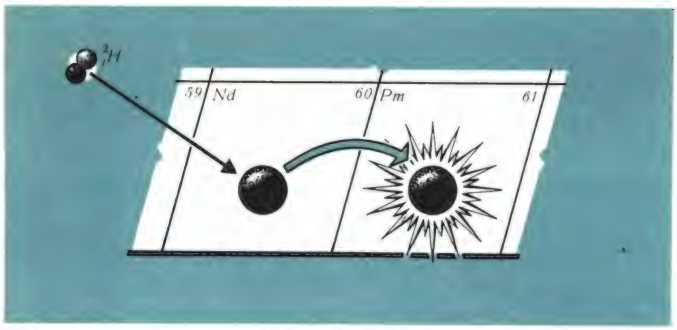


Рис. 13.

мент, изготовленный техническим, искусственным путем.

Вот как был осуществлен синтез технеция. Пластинка молибдена подвергалась интенсивной бомбардировке ядрами тяжелого изотопа водорода — дейтерия, которые были разогнаны в циклотроне до огромной скорости.

Ядра тяжелого водорода, получившие очень большую энергию, проникли в ядра молибдена. После облучения в циклотроне пластинка молибдена была растворена в кислоте. Из раствора было выделено с помощью тех же реакций, которые необходимы для аналитического определения марганца (аналог элемента № 43), ничтожное количество, как говорят химики — следы, нового радиоактивного вещества. Это и был новый элемент — технеций. Он образовался при ядерной реакции между молибденом и тяжелым водородом. Вскоре были подробно изучены его химические свойства.

Так же как и природные элементы, технеций подчиняется закону природы — периодическому закону Менделеева. Все его свойства точно соответствуют положению элемента в менделеевской таблице.

С того времени, как был создан технеций, прошло немало лет. Теперь технеций стал вполне доступным: он образуется в довольно большом количестве в атомных реакторах. Технеций очень хорошо изучен, получен даже его спектр. Вновь созданный элемент уже практически используется. С помощью технеция исследуют процесс коррозии металлов. Он помогает ученым найти пути и способы сохранить одно из основных богатств человечества — железо (стальные конструкции, изделия, машины) от разрушения и ржавчины.

Метод, каким был создан 61-й элемент, очень похож на метод, которым получают технеций. Элемент № 61 должен был встать среди редкоземельных элементов: 61-я клетка находится между неодимом (№ 60) и самарием (№ 62). Новый элемент впервые был получен в 1938 г. в циклотроне бомбардировкой неодима ядрами дейтерия (рис. 13). Химическим путем 61-й элемент был выделен лишь в 1945 г. из осколочных элементов, образующихся в ядерном реакторе.

Новый элемент получил символическое имя *прометий*. Это название было дано ему неспроста. Древнегреческий миф рассказывает о том, что титан Прометей похитил с неба огонь и передал его людям. За это он был наказан богами: его приковали к скале, и громадный орел ежедневно терзал его. Название «прометий» не только символизирует драматический путь похищения наукой у природы энергии ядерного деления и овладения этой энергией, но и предостерегает людей от страшной военной опасности в образе стервятника, угрожающего человечеству — Прометею.

Прометий теперь уже получают в большом количестве, и он нашел неплохое практическое применение: из него делают атомные батарейки — источники постоянного тока, способные действовать без перерыва несколько лет.

Аналогичным путем был синтезирован и самый тяжелый галоген экаиод — элемент № 85. Он впервые был получен бомбардировкой висмута (№ 83) ядрами гелия (№ 2), ускоренными в циклотроне до больших энергий (рис. 14).

Ядра гелия, второго элемента в периодической системе, обладают двумя зарядами. Поэтому, чтобы создать 85-й элемент, и был взят висмут — 83-й элемент. Новый элемент назван *астатом*, что означает «неустойчивый». Он радиоактивен, быстро исчезает. Его химические свойства также оказались точно соответствующими периодическому закону. Он похож на иод. (О том, как нашли технеций, франций и астат в земных минералах, рассказано в ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов».)

Как были открыты трансурановые элементы

Вопрос о границах периодической системы наиболее сложен. Сколько элементов существует в природе? Сколько их может быть создано человеком?

В пределах от водорода до урана их ровно 92 — ни больше, ни меньше. Это доказано периодическим законом. До водорода нет ни одного: не может быть атома с зарядом ядра меньше единицы. Но периодический закон химических элементов не дает ответа на вопрос, сколько же элементов за ураном.

Много труда положили химики, разыскивая в природе элементы тяжелее урана. Не раз в научных журналах появлялись торжествующие извещения о «достоверном» открытии нового «тяжелого» элемента с атомной массой большей, чем у урана. Например, элемент № 93 «открывали» в природе многократно, он получал имена «богемий», «секваний». Но эти ложные открытия оказывались каждый раз

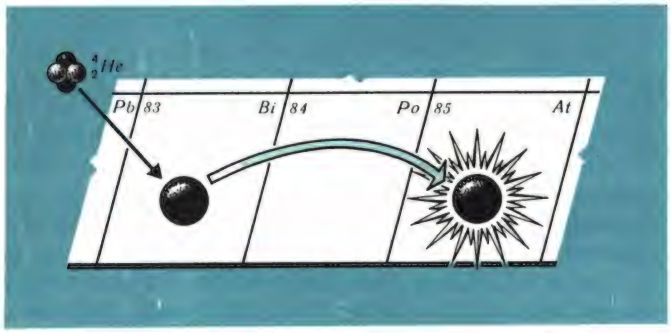


Рис. 14. Синтез астата. Только на основании периодической системы физики могли заранее знать, что получить в природе последний отсутствовавший галоид — элемент № 85 (экаиод) можно из висмута — элемента № 83, применив быстрые ядра гелия.

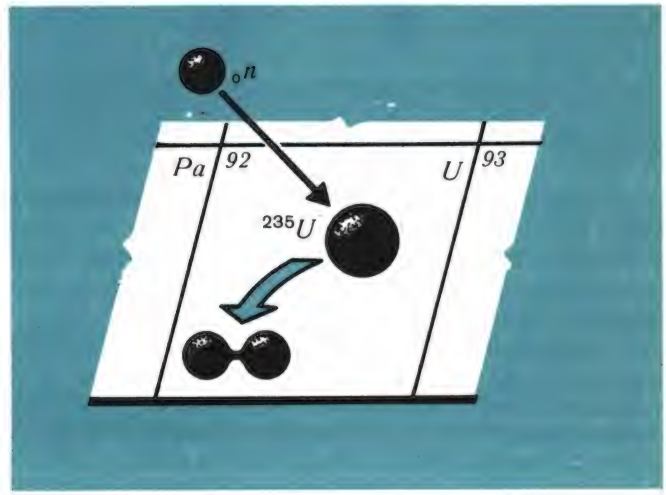


Рис. 15. Когда нейтрон попадает в ядро урана-235, оно возбуждается, в нем возникают сильные колебательные движения, похожие на колебания капли воды.

следствием ошибок. Они, по существу, характеризуют чрезвычайную трудность точного аналитического определения ничтожных следов нового неизвестного элемента с неизученными свойствами.

Результат этих поисков был отрицательным, потому что элементов, соответствующих тем клеткам таблицы Менделеева, которые должны быть расположены за 92-й клеткой, на Земле практически нет.

Первые попытки искусственно получить новые элементы тяжелее урана были связаны с одной из замечательных ошибок в истории развития науки. Было замечено, что под влиянием потока нейтронов многие элементы становятся радиоактивными и начинают испускать β-лучи. Ядро атома, потеряв отрицательный заряд, сдвигается в периодической таблице на одну клетку вправо, и его порядковый номер становится на единицу больше — происходит превращение элементов. Под воздействием нейтронов образуются более тяжелые элементы.

Естественно, что была сделана попытка подействовать нейтронами и на уран. Ученые надеялись, что, так же как и у других элементов, у урана при этом появится β^--активность и в результате β^--распада возникнет новый элемент с номером, на единицу большим, который и должен занять 93-ю клетку в системе Менделеева. Было высказано предположение, что этот элемент должен быть похож на рений, поэтому он был заранее назван экарением.

Первые опыты, казалось, сразу же подтвердили такое предположение. Даже больше — было обнаружено, что при этом возникает не один новый элемент, а несколько. Были опубликованы сообщения о возникновении сразу шести новых элементов тяжелее урана. Кроме экарения были «обнаружены» экаосмий, экаиридий, экаплатина и эказолото.

И все открытия оказались ошибкой. Но это была замечательная ошибка. Она привела науку к величайшему из достижений физики за всю историю человечества — к овладению энергией атомного ядра.

Оказалось, что все было не так. Никаких трансурановых элементов не было найдено. У странных новых элементов тщетно пытались найти предполагаемые свойства, которыми должны были обладать элементы от экарения до эказолота. И вдруг среди этих элементов неожиданно были обнаружены радиоактивный барий и лантан. Не трансурановые, а самые обычные, но радиоактивные элементы, места которых находятся в середине периодической таблицы Менделеева.

Прошло немного времени, и этот очень неожиданный и очень странный результат был правильно понят.

Почему из атомных ядер урана, стоящего в конце периодической системы элементов, при действии нейтронов образуются ядра элементов, места которых находятся в ее середине? Например, было найдено, что при действии нейтронов на уран возникают элементы, соответствующие следующим клеткам периодической системы:

35 — бром	и	57 — лантан
36 — криптон	и	56 — барий
37 — рубидий	и	55 — цезий
38 — стронций	и	54 — ксенон
39 — иттрий	и	53 — иод
40 — цирконий	и	52 — теллур

Много элементов было найдено в невообразимо сложной смеси радиоактивных изотопов, образующихся в уране, облученном нейтронами. Хотя все они оказались старыми, давно знакомыми химикам элементами, в то же время это были новые вещества, впервые созданные человеком.

В природе нет радиоактивных изотопов брома, криптона, стронция и других тридцати четырех элементов — от цинка до гадолиния, возникающих при облучении урана.

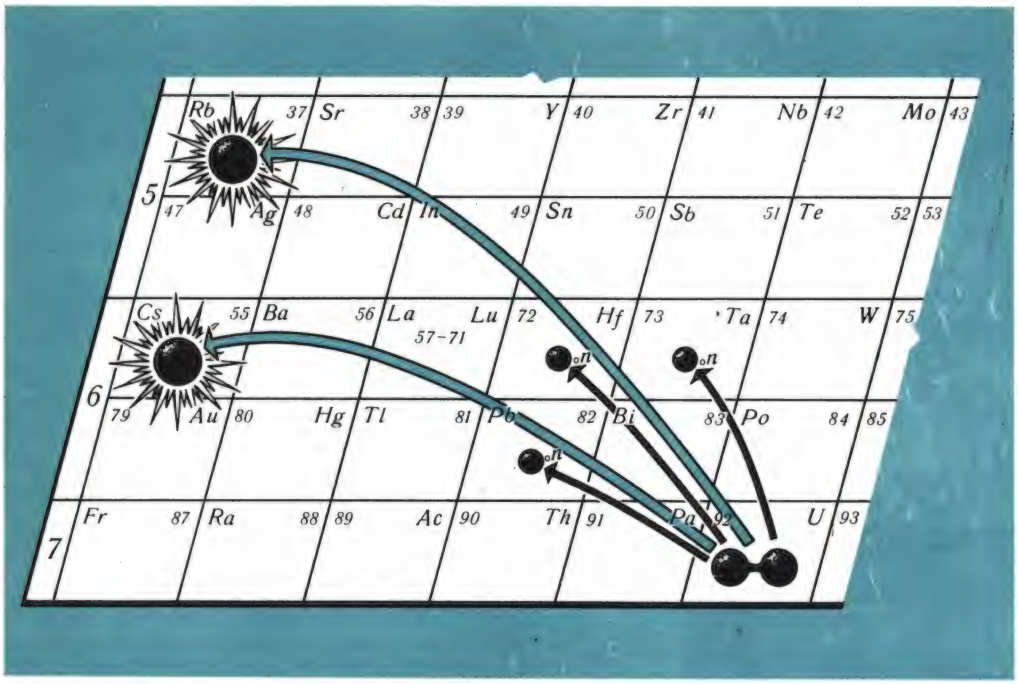


Рис. 16. Возбужденное ударом нейтрона ядро урана-235 раскалывается на две части. Получается два ядра-осколка. Обычно у них разная масса и разные заряды. Таким образом возникают радиоактивные изотопы элементов, находящихся в середине периодической таблицы. При таком делении из ядра урана-235 вылетают 2—3 новых нейтрона, каждый из которых может вызвать расщепление нового ядра урана-235.

В науке часто так бывает: самое загадочное и самое сложное оказывается простым и ясным, когда оно разгадано и понято. Когда нейтрон попадает в ядро урана, оно раскалывается, расщепляется на два осколка — на два атомных ядра меньшей массы (рис. 15). Эти осколки могут быть различного размера, поэтому-то и образуется так много различных радиоактивных изотопов обычных химических элементов.

Одно атомное ядро урана (92) распадается на атомные ядра брома (35) и лантана (57), осколки при расщеплении другого могут оказаться атомными ядрами криптона (36) и бария (56). Каждый раз сумма атомных номеров образующихся осколочных элементов будет равна 92.

Это было началом цепи великих открытий, изменяющих судьбу человечества. Вскоре обнаружили, что под ударом нейтрона возникают из ядра атома урана-235 не только осколки — ядра с меньшей массой, но и два-три нейтрона (рис. 16). Каждый из этих нейтронов, в свою очередь, способен снова вызвать расщепление атома урана. А при каждом таком распаде выделяется очень много энергии. Это и стало началом овладения человеком внутриатомной энергией.

Среди огромного множества осколочных продуктов при расщеплении ядер урана был впоследствии обнаружен остававшийся долгое время незамеченным первый настоящий трансурановый элемент — № 93 (рис. 17 и 18). Он возникал при действии нейтронов на уран-238. Химическими свойствами он оказался весьма сходным с ураном и совсем не был похож на рений, как это ожидали при первых попытках синтезировать элементы тяжелее урана. Поэтому его и не могли сразу обнаружить.

Первый созданный человеком элемент, лежащий за пределами «естественной системы химических элементов», был назван *нептунием*, по имени планеты Нептун. Его создание расширило для нас границы, определенные самой природой. Так же и предсказанное открытие планеты Нептун расширило границы наших знаний о Солнечной системе.

Вскоре был создан и 94-й элемент. Он также получил имя, взятое «с неба», в честь последней планеты Солнечной системы. Его назвали *плутонием*. В периодической таблице Менделеева он следует по порядку за нептунием, аналогично последней планете Солнечной системы Плутону, орбита которой лежит за орбитой Нептуна.

Элемент № 94 был обнаружен точно в соответствии с законами построения периодической системы. Он возникает из первого искусственного трансуранового элемента нептуния при его β^--распаде (рис. 19).

Плутоний — единственный из трансурановых элементов, который теперь получают в атомных реакторах в очень больших количествах. Так же как и уран-235, он способен расщепляться под действием нейтронов и применяется как «топливо» в атомных реакторах.

Элементы № 95 и 96 носят названия *америций* и *кюрий*. Они также получаются теперь в атомных реакторах. Оба элемента обладают очень большой радиоактивностью — испускают α-лучи. Радиоактивность этих элементов настолько велика, что растворы их солей нагреваются, закипают и очень сильно светятся в темноте.

Все трансурановые элементы — от нептуния до америция и кюрия — были получены в достаточно больших количествах, чтобы подробно изучить их свойства. В чистом виде это металлы серебристого

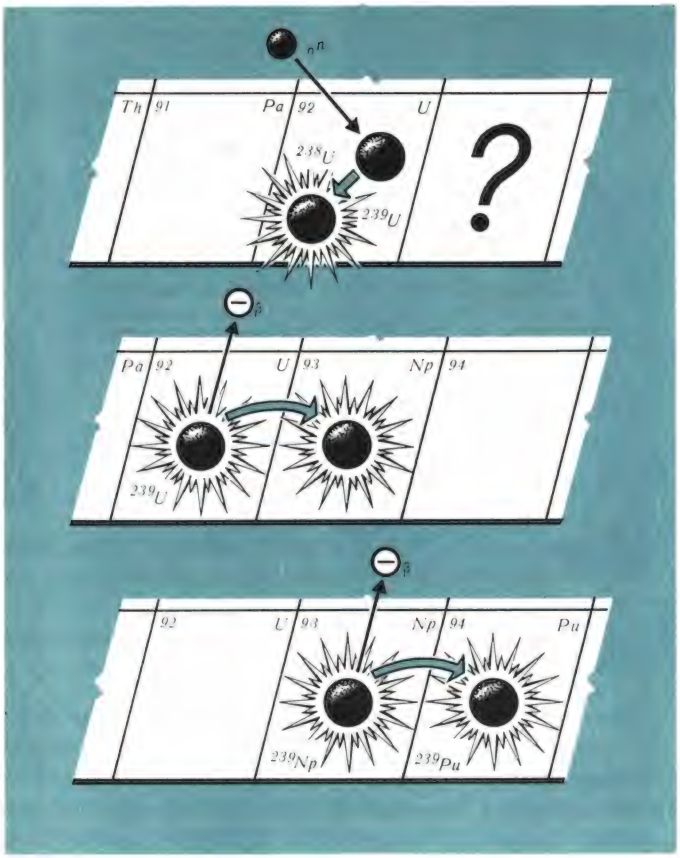


Рис. 17. Нейтрон, попавший в ядро урана-238, остается в ядре. Образуется новый изотоп урана — уран-239. Такого урана в природе нет. Это короткоживущий атом, обладающий β^--радиоактивностью.

Рис. 18. При потере одной β^--частицы уран-239 превращается в элемент № 93 — нептуний — первый трансурановый элемент.

Рис. 19. Нептуний, теряя β^--частицу, превращается в плутоний.

цвета, все они радиоактивны и химическими свойствами очень похожи друг на друга, а все вместе — на уран.

Очень интересный элемент *калифорний* — шестой после урана. Калифорний впервые был создан по методу, основанному на периодическом законе: пластинка урана была подвергнута в циклотроне бомбардировке ядрами углерода, обладающими большой энергией. Почему при этом должен получиться 98-й элемент калифорний, сообразите сами. Рисунок 20 вам в этом поможет.

Был выделен в чистом виде и 97-й элемент — *берклий*. Для этого пришлось положить чистый препарат плутония внутрь ядерного реактора, где он целых шесть лет находился под действием мощного потока нейтронов. За это время в нем накопилось несколько микрограммов элемента № 97. Плутоний извлекли из атомного реактора, растворили в кислоте и из смеси выделили наиболее долгоживущий берклий-249. Он радиоактивен — за год распадается наполовину. Пока удалось получить только несколько микрограммов берклия. Но этого количества хватило ученым, чтобы точно изучить его химические свойства.

Очень интересна история открытия двух следующих трансурановых элементов: 99-го и 100-го. Впервые они были найдены в облаках и в «грязи». Чтобы изучить, что образуется при термоядерных взрывах, самолет пролетел сквозь взрывное облако, и на бумажные фильтры были собраны пробы осадка. В этом осадке и были найдены следы присутствия двух новых элементов. Чтобы получить более точные данные, на месте взрыва собрали большое количество «грязи» — измененной взрывом почвы и горной породы. Эту «грязь» переработали в лаборатории и из нее выделили два новых элемента. Их назвали *эйнштейнием* и *фермием*, в честь ученых Эйнштейна и Ферми, которым человечество многим обязано за открытие путей овладения атомной энергией. Эйнштейну принадлежит закон эквивалентности массы и энергии, а Ферми построил первый атомный реактор.

Найдены и другие методы получения обоих этих элементов, правда, пока еще в столь исчезающе малых количествах, что даже увидеть их никому не удалось.

Одним из самых великих достижений, которым по справедливости может гордиться наука, следует назвать создание 101-го элемента, который получил имя великого творца периодической системы химических элементов, положившей начало овладению тайнами строения атома,— имя Дмитрия Ивановича Менделеева.

Менделевий был получен следующим образом (рис. 21). На листочек тончайшей золотой фольги нанесли совершенно невидимое покрытие, состоящее приблизительно из одного миллиарда атомов эйнштейния. Альфа-частицы с очень большой энергией, пробивая золотую фольгу с обратной стороны, при соударении с атомами эйнштейния могли вступать в ядерно-химическую реакцию и образовывали атомы нового, 101-го элемента. При таком соударении образовавшиеся атомы менделевия вылетали с поверхности золотой фольги и собирались на другом, расположенном рядом тончайшем золотом листочке. Таким остроумным путем удалось выделить в чистом виде атомы 101-го элемента из сложной смеси эйнштейния и продуктов его распада. Невидимый налет смывался кислотой и подвергался радиохимическому исследованию.

Поистине это было чудом. Исходным материалом для создания 101-го элемента в каждом отдельном опыте служил приблизительно один миллиард атомов эйнштейния. Это очень мало — значительно меньше одной миллиардной доли миллиграмма, а получить эйнштейний в большем количестве было невозможно. Заранее было подсчитано, что из всего миллиарда атомов эйнштейния при многочасовой бомбардировке α-частицами может прореагировать

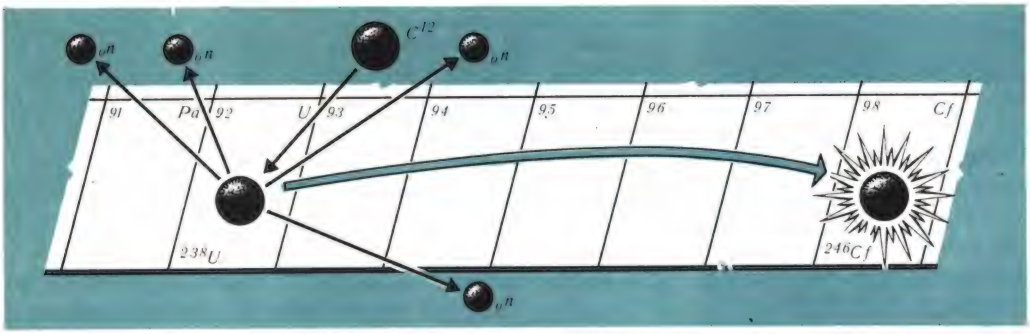


Рис. 20. Калифорний возникает при обстреле урана-238 ядрами углерода.

всего только один-единственный атом эйнштейния и, следовательно, может образоваться только один атом нового элемента. Нужно было не только суметь его обнаружить, но и сделать это так, чтобы выяснить *по одному* лишь *атому* химическую природу элемента.

И это было сделано. Успех опыта превзошел расчеты и ожидания. Удалось заметить при одном эксперименте не *один*, а даже *два* атома нового элемента. Всего в первой серии опытов было получено *семнадцать* атомов менделевия. Этого оказалось достаточно, чтобы установить и факт образования нового элемента, и его место в периодической системе и определить его основные химические и радиоактивные свойства. Оказалось, что это α-активный элемент с периодом полураспада около получаса.

Ученые искусственно изготовили 102-й и 103-й элементы. Первый не получил окончательного названия, а второму дали имя *лоуренсий* (в честь Лоуренса — изобретателя циклотрона).

В 1964 г. советские ученые синтезировали 104-й элемент, а в 1970 г.—105-й (см. ст. «На краю таблицы Менделеева»).

Заглянем в будущее

Пустых мест в менделеевской таблице больше нет. Все они уже заполнены. Все элементы открыты. Уже создано немало новых, каких никогда на Земле не бывало. Так, может быть, все уже сказано? Может быть, могучая идея Д. И. Менделеева, многие десятки лет руководившая развитием химии, завершила все, что она могла дать, и для нее остается только почетная роль повседневной помощницы химиков в их будничной работе? Может быть, принцип периодичности, на котором основана естественная система химических элементов, ограничен только электронной оболочкой атомов? Нет, это неверно.

Когда великий ученый начинал свою работу над естественной системой химических элементов, из 92 известны были 63, а о существовании многих других вообще никто не подозревал. Сколько же элементов мы знаем теперь? Сколько изотопов известно для каждого элемента? Сколько различных атомных ядер существует в природе? Сколько новых создано человеком?

Мы знаем теперь 105 химических элементов. Наверное, скоро будут синтезированы 106-й и 107-й элементы. Ведутся эксперименты, которые, возможно, позволят ученым прорваться в очень далекие области периодической системы. Физики-теоретики предсказывают: элементы с порядковыми номерами 110, 114, 126 окажутся достаточно долгоживущими и поэтому их удастся не только синтезировать, но и изучить их свойства (см. ст. «Вымершие и воссозданные элементы»).

Эти элементы найдут свое место в таблице Менделеева. Сто десятый элемент должен быть химическим аналогом платины, еще одним благородным металлом восьмой группы. Менделеев назвал бы его экаплатиной. Элемент № 114 был бы ближайшим родственником свинца — экасвинцом. А сто двадцать шестой... Ни один химик в мире не взял бы на себя смелость предсказать его свойства.

Почему? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к периодической системе (стр. 368). Такое изображение менделеевской таблицы ныне является самым распространенным, удобным и содержательным. Его называют короткой формой таблицы. Не правда ли, она напоминает здание, очень стройное и изящное в архитектурном отношении?

К сожалению, в этой стройности скрываются несоответствия. Видите ряд элементов, расположенный в самом низу таблицы: актиноиды. Так же как 14 лантаноидов из шестого периода все помещаются в одной-единственной клетке лантана, так и 14 актиноидов все занимают клетку актиния в седьмом периоде. По отношению к лантаноидам этот прием в общем правилен, так как 14 элементов, от церия до лютеция, очень похожи друг на друга и на лантан.

А в случае актиноидов такого химического подобия нет. В первой половине этого семейства каждый элемент имеет самостоятельное лицо. Торий непохож на актиний, уран отличается и от своего левого соседа — протактиния и от правого — нептуния. Свои отличительные особенности у плутония, америция и кюрия.

Для лантаноидов особенно характерна почти постоянная валентность, она равна 3, и только неко-

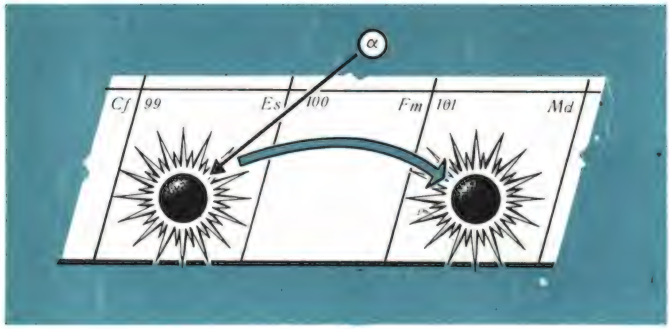


Рис. 21. Менделевий возникает при действии быстрых α-частиц на ядра атомов эйнштейния.

торые редкоземельные элементы могут быть четырехвалентными (церий, празеодим, тербий) или двухвалентными (самарий, европий, иттербий). Трехвалентное состояние самое устойчивое.

Каждый из актиноидов располагает весьма богатым арсеналом валентностей. Например, уран может иметь валентности, равные 2, 3, 4, 5 и 6. Нептуний и плутоний идут еще дальше. В 1967 г. советские ученые Н. Н. Крот, А. Д. Гельман и М. П. Мефодьева обнаружили, что эти элементы могут быть семивалентными. Лишь после кюрия актиноиды, образно говоря, становятся ровнее в своем химическом поведении, трехвалентное состояние оказывается преобладающим. Но и здесь свои сюрпризы.

Наш рассказ преследовал одну цель: убедить вас, что считать актиноиды семейством химических элементов, подобным лантаноидам, ни в коем случае нельзя. И само название «актиноиды» не является строгим: ведь оно означает «подобные актинию». А разве торий, или уран, или нептуний похожи на актиний, который иначе как в трехвалентном состоянии не встречается? Название «актиноиды» предложил в 1945 г. американский ученый Г. Сиборг, но в те времена трансурановых элементов было еще очень мало, а свойства их только начинали изучать.

А в итоге получается: в седьмом периоде системы элементов существует большая их совокупность, которая не может быть размещена в таблице так, чтобы химик с этим размещением согласился.

Теперь посмотрите: в 104-й и 105-й клетках таблицы мы поместили два недавно синтезированных химических элемента. Курчатовий, как показала оценка его химической природы, похож на гафний, а 105-й — на тантал. Но ведь многие десятилетия аналогами гафния и тантала рассматривались соответственно торий и протактиний. И ниже вольфрама стоял уран. Никто такого расположения не оспаривал вплоть до появления идеи о семействе актиноидов.

Какой же элемент ставить под гафнием: торий или курчатовий? Какой из двух элементов: протактиний или 105-й считать непосредственным аналогом тантала?

Стройность планировки здания периодической системы в его нижнем этаже — седьмом периоде — заметно нарушается. Природа-архитектор эту планировку весьма усложнила. Рамки менделеевской таблицы оказываются слишком жесткими, чтобы безупречно разместить элементы с порядковыми номерами от 90 до 105 и далее.

Наконец, можно обратиться к 126-му элементу. Он будет принадлежать к восьмому периоду, который начнется 119-м элементом — экафранцием. Интересная особенность восьмого периода состоит в том, что он должен содержать 18 элементов, в атомах которых будет впервые заполняться $5g$-подоболочка (значение орбитального квантового числа $l = 4$).

Элемент 126, по-видимому, должен быть членом удивительного семейства $5g$-элементов. Поскольку в их атомах заполняется четвертая снаружи электронная оболочка, то их свойства могли бы оказаться сходными еще в большей степени, чем это мы видели на примере лантаноидов. Это была бы беспримерная химическая близость.

Некоторые ученые считают: так именно дело обстояло бы в действительности, если бы эти элементы существовали (или если бы их удалось синтезировать). Тогда и с элементом 126-м все было бы ясно, и его свойства легко было бы предсказать.

Быстродействующие электронно-вычислительные машины помогают физикам рассчитывать электронные конфигурации атомов неизвестных элементов седьмого и восьмого периодов. Если мы знаем, как устроен атом, то можем судить о свойствах соответствующих элементов. По расположению электронов в атомах 110-го и 114-го элементов можно рассматривать их родственниками платины и свинца.

Для восьмого периода машины дают совершенно неожиданные ответы. Порядок заполнения электронных подоболочек оказывается чрезвычайно сложным. Деталей мы не знаем и не узнаем до тех пор, пока не будут синтезированы какие-либо из «сверхэлементов». Но одно кажется довольно ясным: едва ли $5g$-элементы образуют в таблице новую семью химических близнецов. Их химия не будет такой же однообразной, как у лантаноидов. Она будет очень богатой и интересной, полной сюрпризов.

Загадки периодической системы сейчас скрываются в ее седьмом и восьмом периодах. Химик может пытаться их решать пока что на бумаге. Ядерная физика должна найти и осуществить на практике способы синтеза элементов, расположенных на краю таблицы Менделеева.

Нет ни одного элемента, у которого был бы только один изотоп. Одни элементы состоят из доброго десятка различных видов атомов, у других вообще нет устойчивых изотопов, но нет ни одного элемента, у которого не было бы радиоактивных изотопов.

Всего теперь (1973) уже известно более 1800 различных атомных ядер для 105 элементов.

Сколько же из них создала природа и сколько создано человеком? Такое сопоставление приводит к неожиданному и удивительному результату.

В природе найдено для 89 элементов только около 325 различных изотопов. Совсем еще недавно считалось, что в природе очень мало неустойчивых радиоактивных изотопов.

Было установлено, что 17 радиоактивных изотопов принадлежат ряду урана, в ряде распада тория их 11, в цепочке распада урана-235 найдено 14 изотопов. Кроме них в природе были обнаружены радиоактивные «одиночки»: калий-40, рубидий-87 и несколько других.

Было установлено также, что в природе, на границе с космосом, образуются непрерывно и непрерывно исчезают углерод-14 и изотоп водорода — тритий. Остальные природные изотопы — более 275 — считались устойчивыми.

Но за последние годы развитие измерительной техники привело к неожиданным результатам. Многие из тех изотопов, которые безусловно считались стабильными, вечными, оказались в действительности тоже неустойчивыми, радиоактивными. Таких уже найдено свыше 50.

Среди них есть и поистине удивительные: например, висмут-209 с измеренным периодом полураспада более $2 \cdot 10^{18}$ лет (!), или кальций-48, живущий свыше $1 \cdot 10^{18}$ лет, или изотоп свинца-204, распадающийся наполовину за $1{,}4 \cdot 10^{18}$ лет. По сравнению с такими «мафусаилами», продолжительность жизни которых во много раз превышает возраст самого земного шара, такие изотопы, как железо-58, цинк-64, платина-192 (живут «всего лишь» около 10^{15} лет), можно, пожалуй, назвать «короткоживущими» (!).

С точки зрения науки наших дней трудно уже разграничивать стабильные и нестабильные виды атомных ядер. Несомненно, по мере роста точности и чувствительности измерений будут обнаруживаться все новые и новые, еще более долгоживущие, но, бесспорно, неустойчивые радиоактивные изотопы. И становится оправданным предположение, что, может быть, вообще не могут существовать абсолютно устойчивые, вечные атомные ядра. Всякое вещество всегда изменчиво.

Итак, в природе немногим более 300 различных ядер. Но только за время, истекшее с той поры, как были найдены пути к созданию новых радиоактивных элементов, человек уже сумел получить свыше 1800 новых радиоактивных ядер для всех без исключения элементов.

Будут ли установлены когда-нибудь какие-либо общие закономерности в тех свойствах вещества, которые зависят только от атомного ядра? Это очень большой и принципиально важный вопрос. От ответа на него зависит в будущем и познание природы человеком. Ответ на него — это путь к познанию строения атомного ядра, сегодня во многом еще недоступного. Но мы уже можем сказать, что это будет сделано. И начало будущего ответа на этот важнейший вопрос, который решит наука будущего, намечается в периодической таблице атомных ядер.

Посмотрите внимательно на начальную часть таблицы (стр. 369), которую можно назвать прообразом периодической таблицы атомных ядер. Это по существу та же периодическая таблица Менделеева, но в каждой клетке ее приведены все атомные ядра, известные для того или иного элемента. В нее включены все изотопы всех известных в наши дни элементов — как природные, так и искусственные. Целиком напечатать ее здесь нельзя: она слишком громоздка. Здесь изображено только ее начало — от водорода до скандия.

Обратите внимание на проходящую посередине таблицы толстую черную линию. Зубчатой чертой она соединяет устойчивые изотопы смежных элементов. Присмотритесь: все ядра, расположенные под этой чертой, помечены красным, а над ней они обозначены синим цветом. Эта черта разделяет позитронную и электронную β-неустойчивости атомных ядер.

Очень много замечательно интересных данных содержит таблица атомных ядер, но еще больше она таит в себе. Даже представить себе трудно, сколько тайн будет открыто и какими необъятными возможностями эта таблица поможет овладеть науке!

В таблице атомных ядер четко выражена одна замечательная закономерность, сразу бросающаяся в глаза. Присмотритесь к таблице внимательно, и вы сами заметите различие между четными и нечетными элементами. У каждого нечетного элемента начиная с фтора только один (иногда два) устойчивый изотоп, а у всех четных — по нескольку устойчивых изотопов. Например, у фтора — девятого элемента — один нерадиоактивный изотоп, но зато у его соседей с обеих сторон (у восьмого — кислорода и десятого — неона) их по три. Эта загадочная закономерность может быть прослежена по всей таблице для всех элементов.

В качестве примера можно выбрать уже знакомую нам триаду: железо — кобальт — никель. Для четного железа известны четыре устойчивых изотопа, для четного никеля — пять, а для нечетного кобальта — только один.

Очевидно, что с закономерностью чередования устойчивости четных и нечетных ядер связана и замечательная закономерность распространения четных и нечетных элементов в земной коре и во всем мироздании.

Но не надо думать, что этим и ограничивается периодическая закономерность, проявляющаяся в таблице атомных ядер. Систематическое изучение свойств огромного числа стабильных и радиоактивных ядер всех природных и искусственных изотопов приводит к очень важному выводу, что в атомном ядре существуют энергетические уровни, подобно тому как существуют энергетические уровни во внешних электронных оболочках атомов.

Сопоставление самых разнообразных свойств изотопов, зависящих от атомного ядра, с числом нейтронов или протонов, входящих в его состав, приводит к выводу, что в ядрах существуют нейтронные и протонные оболочки, что в строении атомных ядер существуют периоды так же, как существуют периоды в строении атомных оболочек. И если электронные оболочки становятся особенно устойчивыми, когда они содержат 2 (гелий), 10 (неон), 18 (аргон), 36 (криптон), 54 (ксенон) и 86 (радон) электронов, то внутриядерные нейтронные и протонные оболочки становятся наиболее устойчивыми, когда в атомных ядрах содержится 2, 8, 20, 50, 82 и 126 нуклонов (протонов или нейтронов). Эти удивительные числа — они недаром получили название *магических чисел* — определяют устойчивость атомных ядер и особую периодичность в изменении их физических свойств.

Изотопы с магическими числами протонов или нейтронов обладают особенно высокой распространенностью в природе, элементы с магическим числом протонов обладают особенно большим числом стабильных изотопов. Магические ядра наиболее устойчивы по отношению к захвату нейтронов при ядерных реакциях, они наиболее прочны, подобно тому как наиболее прочны атомы благородных газов.

Все четыре цепочки радиоактивного распада урана, актиния, тория и нептуния заканчиваются на магических ядрах:

$$^{206}_{82}Pb,\ ^{207}_{82}Pb,\ ^{208}_{82}Pb,\ ^{209}_{83}Bi.$$

С первого взгляда может показаться, что закономерность чередования четных и нечетных элементов нарушена у хлора (17), аргона (18) и калия (19). Но это результат проявления «магических» свойств числа 20. Все ядра с 20 нейтронами устойчивы; 20 протонов в ядре Ca обеспечивают устойчивость 6 изотопам.

Изучение таких свойств у атомных ядер, как магнитные свойства, абсолютная распространенность, дефект массы ядра, энергия связи, радиоактивность, показывает, что в них наблюдаются периодические изменения, периоды которых обусловлены наличием в некоторых ядрах магического числа протонов или нейтронов. На этих устойчивых ядрах заканчиваются периоды в таблице атомных ядер, аналогично тому как в таблице химических элементов периоды заканчиваются на устойчивых атомах благородных газов. На начальном участке таблицы атомных ядер намечены три первых магических числа: 2, 8 и 20.

Рано еще говорить, что уже существует периодическая система атомных ядер, но Великий закон Менделеева о периодической закономерности в свойствах химических элементов явно оказывается справедливым не только для внешней электронной оболочки атома, но и для атомного ядра, так недавно еще недоступного исследователю. Это указывает на то, что возможности, заключенные в периодическом законе, неисчерпаемы.

Можно быть уверенным, что в ближайшие годы будет создана периодическая система атомных ядер, будут вскрыты глубокие закономерности, связывающие свойства ядра с его количественными характеристиками и с его строением.

Сегодня периодическая таблица элементов служит химикам могучим оружием в борьбе за создание новых химических веществ с заранее заданными свойствами, нужными человеку. Подобно этому периодическая система атомных ядер для химика будущего станет первой ступенью на пути к осуществлению направленного синтеза новых элементов с невиданными свойствами — тех, которые будут необходимы человеку будущего.

Глубоко проникла наука в тайны строения вещества. Человек знает, как построен атом и что происходит в звездах. Одним из наиболее общих законов познанного стал периодический закон химических элементов. Но мир неисчерпаем. И снова наука стоит у порога неведомого. Перед человеком открывается новая беспредельность неизвестного. Новые великие законы должны быть и будут познаны.

Творческий, тяжелый и благодарный труд исследователя, горечь ошибок, радость открытия и неисчерпаемые возможности овладеть новыми, неведомыми, могучими силами природы достаются на вашу долю, читатели Детской энциклопедии. Будьте к этому готовы.

Химия Вселенной

Но не ограничиваются ли роль и значение закона Менделеева только областью химии? Быть может, он важен и нужен только химикам? Он помогает им познавать химические свойства вещества, дает возможность создавать новые соединения с удивительными свойствами. Но нужен ли он биологам, изучающим жизнь, и геологам, проникающим в глубь земного шара, и астрономам, открывающим тайны мироздания? Быть может, он их мало интересует, чужд им, далек так же, как далеки пробирки и колбы в лаборатории химика от сияющей на небосводе звезды? Нет, это не так.

Великий периодический закон имеет громадное значение в самых различных областях знания. Совершенно ясно, что периодический закон необходим школьнику, только начинающему изучать химию. А если седовласый академик перестал заглядывать в таблицу Менделеева, то это просто потому, что он давно ее знает наизусть.

Химия Земли

Для геологов, исследующих нашу планету, наиболее важно знать самые общие законы, определяющие поведение вещества на поверхности земной коры, в ее толщах и в глубинах земного шара. Геолог не может искать вслепую. Он заранее должен знать, где он может найти железо, где — уран, где — фосфор, где — калий. Он должен знать, какие условия создают на Земле залежи углерода: где надо искать уголь, где — графит и где — алмазы. Геологу нужно знать, какие элементы сопутствуют друг другу в земной коре, он должен знать законы образования совместных месторождений различных элементов.

В сложных, грандиозных химических процессах, протекающих в земной коре и на ее поверхности сотни миллионов лет, продолжающихся и в наши дни, сходные своим положением в периодической системе элементы обладают сходной геохимической судьбой. Это позволяет геохимикам проследить их движение в земной коре и выяснить законы, распределяющие их на поверхности Земли.

Геохимическое поведение различных элементов определяется прежде всего строением внешних электронных оболочек в их атомах, размерами атомов и соответствующих ионов. Элементы с завершенными внешними электронными оболочками (благородные газы) существуют только в атмосфере; они не вступают в природных условиях в химические соединения. Даже гелий и радон, образующиеся при радиоактивном распаде, не захватываются полностью горными породами, а непрерывно поступают из них в атмосферу. Редкие земли, стоящие в одной клетке таблицы, встречаются в природе почти всегда вместе. В одних и тех же рудах всегда присутствуют совместно и цирконий и гафний.

Геологи хорошо знают, что осмий и иридий нужно искать там же, где и платину. В периодической таблице Менделеева они стоят вместе в восьмой группе и так же неразлучны в природе. Месторождения никеля и кобальта сопутствуют железу, и в таблице они в одной группе и в одном периоде.

Основная толща земной коры состоит из немногих минералов; все это химические соединения элементов, расположенных главным образом в коротких периодах и в начале и в конце каждого из длинных периодов таблицы. Причем преобладают среди них легкие элементы с малыми порядковыми номерами. Эти элементы составляют основную массу силикатных горных пород.

Элементы, стоящие в периодической системе в середине длинных периодов, образуют рудные, чаще всего сульфидные, месторождения. Многие из этих элементов встречаются в самородном состоянии.

И распространенность и геохимическое поведение элемента (его миграция в земной коре) определяются его положением в периодической системе. Распространенность зависит от строения атомного ядра, геохимическое поведение — от строения электронной оболочки.

Поэтому периодическая система элементов необходима геохимику. Без нее не могла бы возникнуть и развиваться геохимия. Эта наука устанавливает общие закономерности во взаимном сосуществовании химических элементов в горных породах и рудах. Она дает возможность геологу находить в земной коре месторождения полезных ископаемых.

Периодический закон Менделеева — надежный и испытанный компас геохимика и геолога.

Химия планет

Сведения о химии планет растут очень быстро. За последние годы мы много узнали о законах химических превращений вещества и о его составе на таинственных далеких мирах — наших соседях во Вселенной.

Меркурий — самая близкая к Солнцу планета. Но что происходит на планете, мы пока знаем очень мало. Его масса слишком мала (0,054 земной), температура на солнечной стороне слишком велика (больше 400° С), и молекулы любого газа с огромной скоростью покидают поверхность планеты, улетая в космическое пространство. Наверное, Меркурий покрыт силикатными породами, сходными с земными.

Советские ученые отправили на *Венеру* несколько автоматических лабораторий.

Теперь получены достоверные сведения о химическом составе ее атмосферы и об условиях на ее поверхности.

Посланные с Земли советские автоматические межпланетные станции «Венера-4», «Венера-5» и «Венера-6» сделали прямой химический анализ состава атмосферных газов, измерили давление и температуру. Полученные сведения были переданы на Землю.

Теперь достоверно известен состав атмосферы этой планеты:

углекислого газа (CO_2)	около 97%,
азота (N_2)	не более 2%,
водяного пара (H_2O)	около 1%,
кислорода (O_2)	не более 0,1%.

На поверхности Венеры жизнь невозможна. Термометр космической лаборатории показал температуру около 500° С, а давление оказалось около 100 атм.

Поверхность Венеры (почти наверное) — раскаленная каменистая пустыня.

Советские и американские ученые отправили автоматические исследовательские станции и на *Марс*. Установлено, что атмосфера этой планеты состоит почти из углекислоты, есть немного азота, кислорода и водяного пара. Атмосфера Марса очень разрежена, ее давление на поверхности в 100 с лишним раз меньше, чем на Земле. На Марсе преобладают температуры ниже 0° С. Огромные суточные колебания температуры становятся причиной страшных пыльных бурь. Поверхность планеты, как на Луне, покрыта множеством кратеров. Марс — холодная безжизненная пыльная пустыня.

Самая интересная, удивительная и загадочная химия — это химия *Юпитера*. Недавно было открыто радиоизлучение Юпитера. Какие процессы могут порождать радиоволны на этом холодном гиганте — загадка. Теоретики подсчитали, что ядро планеты должно быть жидким. Оно окружено оболочкой из металлического водорода, там царствуют давления в миллион атмосфер. Ученые настойчиво пытаются получить металлический водород в лабораториях. Основываясь на термодинамических расчетах, они уверены в успехе.

Юпитер окутан плотной атмосферой, толщиной в десятки тысяч километров. Химики открыли в атмосфере Юпитера много различных соединений. Все они, конечно, построены в полном соответствии с периодическим законом. На 98% Юпитер состоит из водорода и гелия. Обнаружены также вода и сероводород. Найдены признаки метана и аммиака. Средняя плотность Юпитера очень мала — 1,37 г/см^3.

Физики рассчитали, что внутреннее ядро Юпитера должно быть очень горячим. От Солнца он получает мало тепла — в 27 раз меньше, чем Земля, и при этом 40% отражает обратно в космос. Но излучает он в четыре раза больше, чем поглощает. Откуда Юпитер берет лишнюю энергию, как она возникает — неизвестно. Термоядерные процессы на нем невозможны. Быть может, эта избыточная энергия является энергией сжатия планеты?

Внешняя поверхность Юпитера очень холодная — от —90 до —120° С. Следовательно, внутри его атмосферы должны быть области, где условия мало отличаются от земных. Толщина такой зоны отнюдь не мала, около 3000 км. В этой зоне температурные колебания лежат в пределах от —5 до +100° С. Вода здесь должна быть жидкой, а другие соединения атмосферы — газообразными.

Астрономы считают, что снаружи Юпитер покрыт облачной оболочкой, состоящей из твердых частиц льда и аммиака. Поэтому он так ярко блестит на небе. В телескоп на поверхности Юпитера отчетливо видны полосы загадочных облаков, плывущих с гигантскими скоростями. Это царство ураганов и чудовищных гроз.

Ученые пытались в лаборатории воссоздать условия атмосферы Юпитера. Результаты получились неожиданными. Под действием электрических разрядов (грозы), ионизирующего и ультрафиолетового излучений (солнечный свет и космические лучи) в газовой среде, подобной по составу атмосфере Юпитера, возникали сложные органические соединения: мочевина, аденин, углекислота, даже некоторые аминокислоты и сложные углеводороды. Кроме того, были получены цианополимеры красного и оранжевого цвета. Их спектры оказались сходными со спектром загадочного красного пятна на Юпитере. Перед учеными возник вопрос: есть ли на Юпитере жизнь? Для наших земных организмов атмосфера этой планеты — яд. Но может быть, это зона первичных форм жизни, океан добиологических соединений, необходимых для возникновения самых прими-

тивных, простейших форм жизни? А может быть, они там уже возникли?

О том, что происходит на остальных планетах — Уране, Нептуне, Плутоне, мы пока почти ничего не знаем. Вероятно, это застывшие ледяные пустыни.

Поразительные достижения космической химии позволили начать исследования процессов, протекающих на поверхности далеких, пока еще недоступных миров. Это приводит к очень важному выводу: самая прекрасная планета — наша родная Земля. Долг каждого человека — бережно относиться ко всем ее богатствам и красоте.

Химия Солнца

Трудно даже вообразить, что человек может изучить химию Солнца. Но наука сумела многое сделать: мы знаем теперь химический состав Солнца, знаем (и знаем уже немало) о грандиозных процессах — источниках солнечной энергии.

С помощью спектрального анализа было найдено на Солнце более 60 элементов периодической системы Менделеева.

Определены даже количественные соотношения между химическими элементами на Солнце. Оказалось, что Солнце — это мир раскаленного водорода. Водородных атомов там почти в 5 раз больше, чем атомов гелия, и в 1000 раз больше, чем атомов всех остальных элементов, вместе взятых.

Среди других элементов на Солнце преобладают углерод, кислород и азот. Немало там и магния, алюминия, кремния, серы, железа. В меньшем количестве присутствуют калий, кальций, натрий, свинец и др. Обнаружено даже несколько представителей редких земель; можно быть уверенным, что будут найдены и остальные. Как и повсюду в мироздании, на Солнце преобладают легкие элементы, с малыми атомными номерами. Кроме того, как правило, элементов с четными порядковыми номерами на Солнце значительно больше, чем их соседей по периодической таблице с нечетными номерами.

Обнаружены на Солнце и простейшие химические соединения, молекулы которых способны выдержать очень высокую температуру. Это не какие-нибудь особые, «солнечные» соединения — нет, химики умеют их получать и исследовать на Земле. Это простейшие радикалы: CH, OH, NH, CaH, SiH, CN. Более сложные молекулы, вероятно, не могут существовать на Солнце.

С точки зрения старой химии, имеющей дело только с электронными оболочками атома, химия Солнца, по-видимому, очень проста. Но на Солнце протекают процессы ядерной химии, и в очень грандиозных масштабах.

Периодический закон Менделеева помогает разобраться в том, что происходит на Солнце (и, конечно, на звездах, похожих на наше Солнце) и какие превращения испытывают на Солнце атомные ядра. В его недрах, при немыслимо высоких температуре и давлении, атомы элементов теряют почти все свои электроны. В условиях сжатого до огромной плотности газа, состоящего главным образом из протонов и электронов, ядер гелия и относительно небольшой примеси ядер и ионов других элементов, протоны могут вступать между собой и с ядрами других элементов в ядерно-химические реакции.

Солнце — это мир водорода. Ядра остальных элементов окружены со всех сторон протонами (ядрами водорода) и могут сталкиваться почти исключительно лишь с протонами. Другие столкновения происходят значительно реже. Если скорости и энергия сталкивающихся атомных ядер достаточно велики, то при столкновении оба ядра сливаются, и возникает новый элемент.

На Солнце протекает очень много различных ядерных реакций. Далеко не все они хорошо изучены, о многих из них мы еще и не подозреваем.

Одна из известных нам ядерных реакций на Солнце имеет особое значение. Она определяет природу Солнца. Это реакция образования гелия из водорода. Она протекает различными путями. Протоны могут соединяться непосредственно друг с другом. При этом образуются ядра дейтерия (тяжелый изотоп водорода) и гелия-3 (легкий изотоп гелия). Реагируя с протонами, они образуют ядра гелия-4.

Но еще интереснее и важнее сложная ядерная каталитическая реакция — синтез гелия из водорода на углеродных атомах. Эта реакция протекает не сразу, а в несколько ступеней. Катализатором в этой солнечной реакции служит углерод, точнее, его наиболее распространенный изотоп ^{12}C, тот самый, которого больше всего и на Земле.

Первая стадия реакции — соединение ядер водорода с ядрами изотопа углерод-12. При этом возникает атомное ядро с семью положительными зарядами: у углерода их шесть, а с протоном добавляется еще один. С таким атомным ядром ученые знакомы; на Земле его нет, но они уже умеют получать его искусственно.

Согласно правилу сдвига элемент при увеличении заряда ядра на единицу превращается в другой, занимающий в таблице Менделеева следующую по

порядку клетку. Углерод-12, захватив протон, превращается в азот — в радиоактивный изотоп азота — азот-13. Период его жизни невелик: за 10 мин он распадается наполовину. Выбрасывая позитрон и нейтрино, тяжелый азот превращается снова в тяжелый изотоп углерода ^{13}C. Не нужно думать, что это какой-то особенный «солнечный» углерод. Его много и на Земле: в земном углероде изотопа ^{13}C около 1%.

Образовавшееся ядро тяжелого углерода ^{13}C, подвергаясь новым ударам протонов, может слиться с тем из них, который обладает достаточно большой энергией. При этом, как следует из закономерностей периодического закона, возникает ядро азота, но уже с большей атомной массой: на этот раз возникает самый обычный азот ^{14}N, который содержится в атмосфере Земли и который мы вдыхаем вместе с кислородом.

Какие бы элементы ни возникали на Солнце в цепи ядерно-химических превращений, какие бы элементы там ни существовали, их судьба предопределена: они снова и снова должны участвовать в протонных превращениях. Такова же судьба и изотопа азота ^{14}N: его ядра будут реагировать с ядрами водорода. При их соединении, согласно правилу сдвига, должно возникнуть ядро легкого кислорода ^{15}O. Однако такого изотопа на Земле нет, но физики умеют его получать и хорошо изучили его свойства. Он радиоактивен и исчезает в короткое время. При распаде этот изотоп испускает позитрон и нейтрино и уже в третий раз превращается в азот, в тяжелый изотоп азота — ^{15}N. Он стабилен, хорошо известен и в небольшом количестве всегда присутствует в обычном земном азоте.

На Солнце в это атомное ядро снова внедряется протон, и тут ядро ^{15}N сразу распадается, выбрасывая α-частицу (ядро атома гелия), и превращается в ядро изотопа обычного углерода ^{12}C, с которого началась эта удивительная цепь последовательных ядерных превращений.

Итак, на Солнце атомное ядро углерода в результате четырех последовательных ядерных реакций с протонами, трижды превратившись в азот, один раз — в тяжелый углерод, один раз — в кислород, выбросив по дороге два позитрона, потеряв две загадочные частицы — нейтрино, превращается в конце концов в тот же самый изотоп углерода ^{12}C и α-частицу.

В результате углерод остался таким же, каким он и был. Но исчезли четыре водородных ядра, и возникло ядро гелия. Оно сформировалось на углеродном атомном ядре, которое осталось без изменений, послужив ядерным катализатором в ядерно-химической реакции — в синтезе гелия из водорода. Таким образом, водород на Солнце — топливо, а гелий — зола, отбросы.

Долго, невообразимо долго продолжается этот замечательный ядерный цикл реакций: должно пройти почти 5 млн. лет, пока атом углерода после всех последовательных превращений станет снова атомом углерода. Ведь далеко не каждое соударение с протоном ведет к реакции. Требуются миллионы лет, чтобы среди бесчисленного множества столкновений ядер углерода с протонами произошло столкновение с таким быстрым протоном, энергия которого так велика, что он способен проникнуть в маленькую неприступную крепость — атомное ядро.

Но и с такой скоростью (за 5 млн. лет одно полное превращение) эта реакция может идти только при температуре не ниже 20 млн. К. Температура же на поверхности Солнца не превышает 6000 К. Это означает, что тайна Солнца скрыта в его недрах, в его центральных областях, где, как рассчитывают ученые, царят чудовищно высокие температуры, близкие к 20 млн. К.

Не нужно думать, что все только что изложенное — это лишь предположение ученых. Физики уже сумели повторить в лабораториях все стадии солнечного ядерно-химического процесса. Ученым не нужно ждать миллионы лет, чтобы осуществить самую медленную стадию этого цикла. В ускорителях получают протоны с такой большой энергией, которая превышает их возможную энергию при 20 млн. К на Солнце.

Спектроскописты сумели определить, сколько углерода на Солнце. Они измерили, сколько в нем тяжелого изотопа ^{13}C. Физики рассчитали скорость этой реакции, нашли, сколько энергии выделяется при каждом полном цикле. Астрономы измерили массу солнечного шара, рассчитали температуры в его глубинах.

В результате большой общей работы было найдено, что при 20 млн. К при том количестве изотопа ^{13}C, какое было найдено на Солнце, должно возникать ровно столько энергии, сколько ее излучает Солнце.

Несмотря на то что как будто бы ученые выяснили и поняли, каким образом рождается солнечная энергия, дающая жизнь нашей Земле, все еще остается неразгаданной тайна процессов в недрах Солнца. Дело в том, что во всех ядерно-химических реакциях на Солнце, протекающих с выделением позитрона, одновременно должны появляться удивительные, неуловимые, лишенные массы частицы — нейтрино. Но до сих пор ученым не удается, несмотря на все попытки, обнаружить поток нейтрино от

Солнца. Почему их нет, пока никто не знает. Может быть, наши представления о механизме солнечных реакций неверны или эти частицы почему-то до нас не долетают? А может быть, просто мы еще не научились их ловить?

Посмотрите на солнышко, как много чудесного рассказали ученым его ласковые лучи, в которых вы греетесь и загораете летом, о таинственных и загадочных процессах, протекающих за миллионы километров от нашей Земли. Но еще не все понято, не все изучено. Многое и многое остается на вашу долю, юные читатели Детской энциклопедии.

Химия межзвездного пространства

Еще не так давно в науке допускалось, что межзвездное пространство представляет собой пустоту. Все вещество Вселенной сосредоточено в звездах, а между ними нет ничего. Лишь в пределах Солнечной системы где-то по неведомым путям блуждают метеориты и их загадочные собратья — кометы.

Удивительно сложны и неожиданны пути зарождения одной из наук будущего — химии космического пространства. В глухие и страшные годы фашистской оккупации в маленьком голландском городке Лейдене на тайном собрании подпольного научного кружка юный студент Ван де Холст сделал доклад. Исходя из теории строения атома (которая, как мы уже знаем, была развита наукой на основе периодического закона Менделеева) он рассчитал, какова должна быть самая длинная волна в спектре излучения водорода. Оказалось, что длина этой волны 21 см. Она относится к коротким радиоволнам. В отличие от хорошо изученного видимого спектра, излучаемого раскаленным водородом, его радиоизлучение может происходить и при низких температурах.

Ван де Холст рассчитал, что на Земле такое излучение в атоме водорода маловероятно. Нужно ждать много миллионов лет, пока в атоме водорода произойдет перемещение электронов, которое сопровождается излучением радиоволн длиной 21 см.

В своем докладе молодой ученый сделал предположение: если в безграничном мировом пространстве присутствует водород, можно надеяться обнаружить его по излучению на волне 21 см. Это предсказание оправдалось. Оказалось, что из необъятных глубин Вселенной к нам на Землю всегда, не прекращаясь ни ночью ни днем, приходят на волне 21 см поразительные радиосообщения о тайнах мироздания, которые приносит нам межзвездный водород.

Волна в 21 см мчится к нашей планете из столь отдаленных уголков Вселенной, что требуются тысяч

Солнце — ядерный реактор

Может возникнуть вопрос: хороший ли с точки зрения техники наших дней ядерный реактор Солнце? Но какое в этом может быть сомнение?

Давайте посчитаем... Основной источник энергии на Солнце — термоядерная реакция: синтез гелия из водорода. Главным образом за счет этой реакции оно каждую секунду излучает в мировое пространство $3{,}86 \cdot 10^{26}$ Дж.

Только для того чтобы поддержать этот расход энергии, масса Солнца каждую секунду уменьшается на 4,3 млн. тонн!

Из этой невообразимо чудовищной по земным масштабам энергии и до нас доходит немало: у границ земной атмосферы на каждый квадратный сантиметр приходится в секунду энергии 0,14 Дж. Это составляет две калории в минуту на 1 $см^2$. Прикиньте сами, сколько приходится на весь наш земной шар. Неплохой ведь, кажется, реактор! Верно?

Сколько же энергии выделяется на Солнце в расчете на единицу его массы? Какова его удельная мощность? Массу Солнца астрономы сумели измерить очень точно: она равна $1{,}991 \cdot 10^{30}$ кг, или $1{,}991 \cdot 10^{27}$ т. Из этого следует, что удельная мощность Солнца очень невелика, она составляет всего $\frac{3{,}86 \cdot 10^{26}}{1{,}991 \cdot 10^{27}} = 0{,}194$ Вт/т.

Таким образом, удельная мощность Солнца равна всего-навсего приблизительно 0,2 Вт на тонну!

Пожалуй, Солнце не очень эффективный источник энергии.

чи и миллионы лет, пока она дойдет до антенн радиотелескопов. Она рассказала ученым, что в космосе нет пустоты, что в нем существуют невидимые глазу облака космического водорода, которые простираются от одной звездной системы к другой. Оказалось возможным даже определить протяженность и форму этих скоплений водорода. Для волны в 21 см в мировом пространстве нет преград. Даже черные, непроницаемые облака космической пыли, скрывающие от взора исследователя огромные области Млечного Пути, совершенно прозрачны для холодного излучения водорода. И эти волны помогают теперь ученым понять природу вещества, из которого построены далекие звезды не только Млечного Пути, но и самых отдаленных туманностей, лежащих на самом краю доступной нам части Вселенной.

Необъятные звездные миры, разобщенные чудовищными расстояниями в пустом безграничном пространстве, теперь оказываются связанными в единое целое гигантскими водородными облаками. Трудно проследить преемственность в развитии научных идей, но несомненно, что есть прямая и непрерывная связь между смелым предсказанием юного голландского студента и великой идеей Менделеева. Так был найден в межзвездном пространстве водород.

Безграничное мировое пространство нельзя считать пустым. Теперь уже кроме водорода в нем найдено много других элементов.

Химия космоса очень своеобразна. Это химия сверхвысокого вакуума. Средняя плотность вещества в пространстве всего только 10^{-24} г/см^3. Такой вакуум пока нельзя создать в лабораториях физиков. Важнейшую роль в химии космического пространства играет атомарный водород. Следующий по распространенности — гелий, его раз в десять меньше; найдены уже кислород, неон, азот, углерод, кремний — их в космическом пространстве ничтожно мало.

Выяснилось, что роль межзвездного вещества в мироздании огромна. На его долю приходится, по крайней мере в пределах нашей Галактики, почти половина всего вещества, остальная часть находится в звездах.

В химии межзвездного пространства за последние годы сделаны совершенно поразительные открытия. Все началось с того, что в космосе неожиданно обнаружили сложную молекулу цианоацетилена (HC_3N). Не успели космохимики объяснить, каким путем в межзвездном пространстве возникает органическая молекула столь сложного состава и строения, как вдруг с помощью радиотелескопа были открыты в созвездии Стрельца гигантские облака самого обыкновенного на Земле и совершенно неожиданного для космоса химического соединения — муравьиной кислоты (HCOOH). Следующее открытие было еще более неожиданным. Оказалось, что в космическом пространстве существуют облака формальдегида (HCOH). Это само по себе уже достаточно удивительно, но совсем необъяснимым остается тот факт, что разные космические формальдегидные облака имеют разный изотопный состав. Как будто бы история межзвездной среды в разных частях Галактики различна.

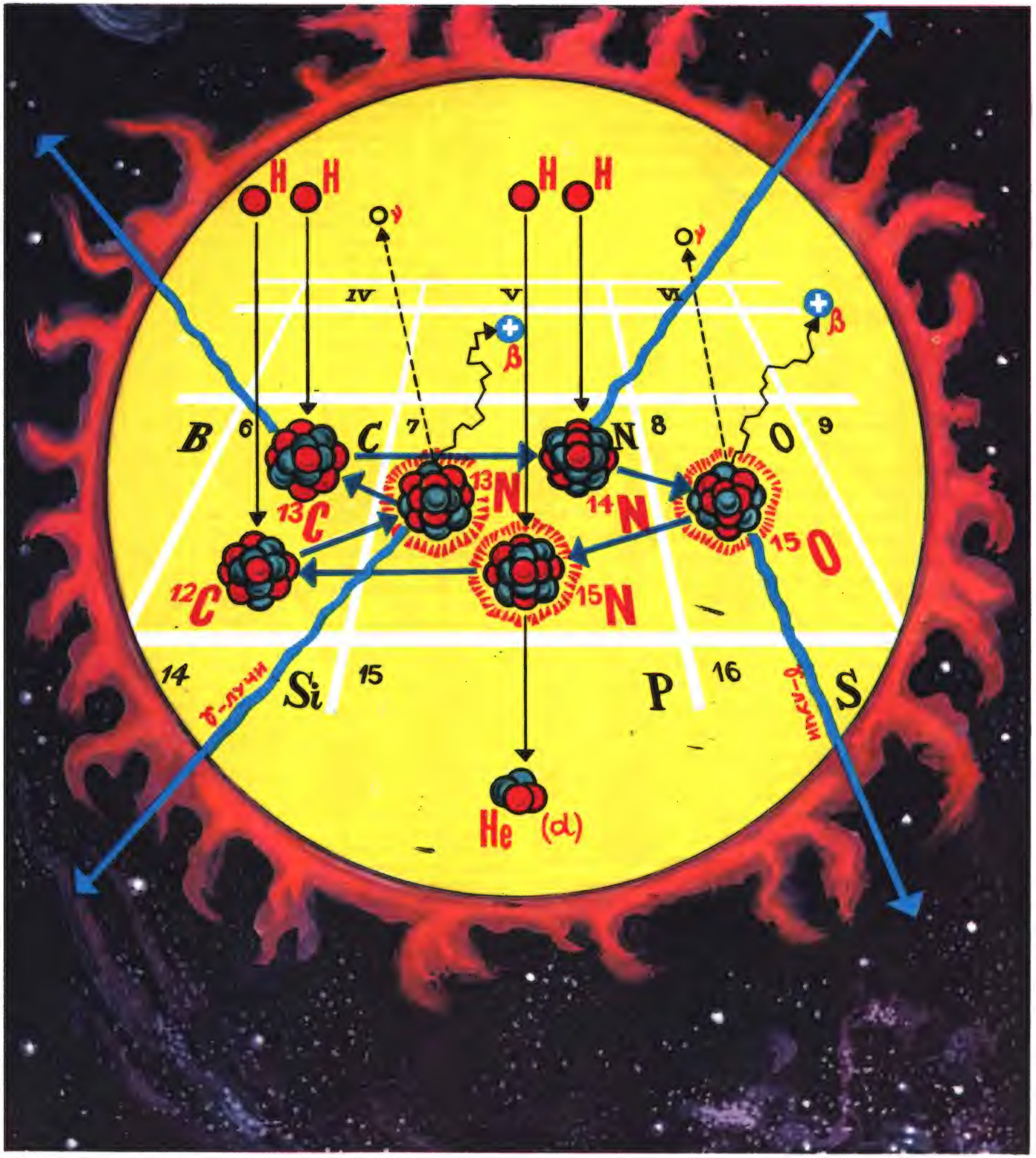
Затем последовало еще более странное открытие: в небольшом облаке межзвездной пыли, лежащем где-то в направлении к центру нашей Галактики, обнаружили аммиак (NH_3). По интенсивности радиоизлучения космического аммиака удалось даже измерить температуру этой области космоса (25 К). Загадка космического аммиака заключается в том, что он в этих условиях неустойчив и разрушается под действием ультрафиолетового излучения. Значит, он интенсивно возникает — образуется в космосе. Но как? Пока это неизвестно.

Химия межзвездного пространства оказалась удивительно сложной. Уже найдены молекулы формамида ($HCONH_2$) — шестиатомные молекулы, состоящие из атомов четырех разных элементов. Как они возникают? Какова их судьба? Были еще найдены молекулы метилцианида (CH_3CN), сероуглерода (CS_2), сероокиси углерода (COS), окиси кремния (SiO).

Кроме того, в космосе были открыты простейшие радикалы: например, метин (CH), гидроксил (OH). Когда установили существование гидроксила, были предприняты поиски воды. Где есть гидроксил, там должна быть и вода, и она была действительно в межзвездном пространстве найдена. Это открытие особенно интересно и важно. В космосе есть вода, есть органические молекулы (формальдегид), есть аммиак. Эти соединения, реагируя между собой, могут привести к образованию аминокислот, что и было подтверждено на опыте в земных условиях.

Что же будет еще обнаружено в межзвездной «пустоте»? В ней найдено более 20 сложных химических соединений. Наверное, будут открыты и аминокислоты. Удивительные космические облака органических соединений, как, например, облако цианоацетилена в созвездии Стрельца, достаточно плотны и обширны. Расчет показывает, что такие облака должны сжиматься под действием сил тяготения. Не может ли оказаться вероятным совершенно фантастическое предположение, что планеты во время своего образования уже содержат сложные органические соединения — основу примитивных форм жизни. Пожалуй, становится вполне допустимым серьезное об-

Глубоко в недрах Солнца температура достигает 20 000 000 К. При такой температуре протекают ядерно-химические реакции между водородом (протонами) и углеродом, азотом и кислородом. На таблице изображен цикл этих реакций и указаны сдвиги элементов в периодической системе, происходящие при этих реакциях. Этот цикл замкнутый. В результате образуются атом гелия и четыре атома водорода. При этом выделяется солнечная энергия.



суждение, казалось бы, совершенно невозможного вопроса: «Что же старше — планеты или жизнь на них?» Конечно, трудно угадать, какой будет ответ на него. Ясно одно — для науки неразрешимых вопросов нет.

На наших глазах зарождается новая наука. Трудно предвидеть пути ее развития и предсказать, к каким еще более удивительным открытиям приведет эта наука — космическая химия.

Химия звезд

В недрах звезд, при немыслимых для Земли условиях, при температурах в сотни миллионов кельвинов и непостижимо огромных давлениях, протекает множество разнообразных ядерно-химических реакций.

В наши дни уже существует обширная область науки, увлекательная химия недоступного — ядерная астрохимия. Она выясняет важнейшие для всей науки вопросы: как образовались во Вселенной элементы, где и какие элементы возникают, какова их судьба в вечном развитии мироздания.

Методы этой науки необычны. Она пользуется и наблюдением — изучает с помощью спектроскопии состав звездных атмосфер, и экспериментом — исследует реакции быстрых частиц в земных ускорителях. Теоретические расчеты позволяют ученым заглянуть в недра звезд, где уже открыто немало интересного и кроется много загадочного.

Выяснено, например, что в центральных областях звезд, при сверхвысоких температурах и давлениях, где скорость «выгорания» водорода особенно велика, где количество его мало, а содержание гелия велико, возможны реакции между ядрами гелия. Там рождаются загадочные ядра бериллия-8 (на Земле они совсем не могут существовать), там возникают и самые прочные ядра: углерод-12, кислород-16, неон-20 и другие ядра «гелиевого» цикла.

Найдены в звездах и такие ядерно-химические реакции, при которых возникают нейтроны. А уж если есть нейтроны, то можно понять, каким путем появляются в звездах и почти все остальные элементы. Но очень много загадок стоит еще перед наукой на этом пути. Непостижимо огромно многообразие звезд во Вселенной.

Вероятно, во всех доступных нашему наблюдению звездах преобладает водород, но содержанием других элементов звезды очень сильно различаются: в некоторых звездах обнаружено такое высокое со-

До Менделеева ничего не было известно об элементах, занимающих теперь в периодической таблице порядковые номера 2, 10, 18, 21, 31, 32, 36, 43, 54, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 75, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105. Одни из них еще не были открыты, другие вовсе не существовали. Достаточно хорошо были изучены только 54 элемента, но правильные значения атомного веса были известны лишь для 49 элементов (они обозначены в таблице *розовым* цветом). Для элементов 22, 52, 76, 77, 79 Менделеев исправил на основании их положения в таблице неточно установленные атомные веса. Не производя никаких измерений, он предсказал новые верные значения атомного веса для элементов 4, 39, 49, 57, 58, 59, 68, 90, 92 (все эти элементы даны *желтым* цветом). Элементы 59 и 60 во времена Менделеева принимали за один элемент, для которого он и предсказал правильное значение среднего атомного веса. Отделить эти два элемента друг от друга удалось значительно позже. Менделеев предсказал существование *двенадцати* новых, до него никому не известных элементов. Для трех из них он даже указал все важнейшие физические и химические свойства не только самих элементов, но и некоторых их соединений. Это были элементы 21, 31 и 32 (*синий* цвет). Кроме этих элементов Менделеев предсказал элементы 43, 72, 75, 84, 85, 87, 88, 89, 91 (*сиреневые клетки*).

По примеру Менделеева, на основании его системы, были предсказаны элементы 10, 36, 54, 86 (отмечены *оранжевым* цветом). Все эти *шестнадцать* предсказанных заранее элементов позднее были обнаружены в природе. Кроме них, тоже после открытия периодического закона, были найдены элементы 2, 18, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71 (*зеленый* цвет). Элементы 43, 61, 85 долгое время найти в природе не удавалось. Они были созданы сначала искусственно. Элементы 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105 лежат за пределами таблицы, существовавшей при жизни Менделеева. Их тоже не было на Земле, все они созданы искусственно, и пути для их синтеза указаны периодическим законом (эти элементы помечены *палевым* цветом). Элементы 43, 85 и 87 помечены на таблице двумя цветами. Это искусственно полученные элементы, существование которых было предсказано Менделеевым.

Периодическая таблица атомных ядер очень важна и интересна. Здесь, правда, приведено только ее начало — от водорода до скандия. Полностью, к сожалению, поместить ее нельзя: уж очень она велика. Конечно, нужно немало знать, чтобы свободно читать эту удивительную таблицу и пользоваться ею. Некоторым она может показаться непонятной и многое в ней останется неясным. Этим читателям следует вернуться к ней еще не раз, подготовившись хорошенько.

Содержание таблицы очень глубоко и обширно. Из нее можно узнать, сколько различных изотопов существует у любого элемента, какие они и каковы их свойства. Но самое главное в таблице — это отчетливое проявление периодических закономерностей в свойствах атомных ядер. Наиболее важные обозначения разъяснены в самой таблице. Правда, не все. Догадливый читатель сам сообразит, что обозначают некоторые из них, а о других пусть постарается узнать самостоятельно.

Присмотритесь к таблице. На ней нанесены *все* известные в настоящее время ядра — все изотопы 21 элемента в начале таблицы Менделеева. Их очень много — более 160. Большинство из них радиоактивны, неустойчивы; стабильных сравнительно немного — всего 47. Химические свойства любого изотопа каждый химик легко определит по символу элемента — все типы его атомных ядер расположены в одном столбце. Массовое число каждого ядра помечено сбоку, справа, от обозначения изотопа. Порядковый номер элемента, как и полагается, находится рядом с его химическим символом. Сколько нейтронов содержит ядро данного изотопа — сосчитайте сами.

Очень легко узнать, стабилен данный изотоп или нет, можно ли его обнаружить в природе, каково его относительное содержание. На это указывают цифры внутри ромбиков, они обозначают изотопный состав природного элемента, выраженный в процентах. Нетрудно узнать и радиоактивные свойства любого изотопа. Цвет кружка показывает, какой у этого изотопа тип распада. Период полураспада указан внутри кружка. Одни атомные ядра живут очень долго — иногда даже сотни тысяч лет (*л*), другие исчезают через несколько дней (*д*), часов (*ч*), минут (*м*), секунд (*с*), а есть даже и такие, что существуют всего лишь несколько миллисекунд (*мс*).

Ломаная черная линия соединяет устойчивые ядра. Тонкие красные линии проведены по устойчивым четным ядрам, они ограничивают область устойчивости. Лиловый участок линии стабильности отмечает область магического числа 20.

Сложное строение таблицы отражает, как сложен мир атомного ядра. В нем пока еще не все ясно и самим физикам. Это периодическая таблица будущего. Над ней сейчас много работают ученые. Она не завершена. Будут еще открыты и созданы новые атомные ядра, новые изотопы и выявлены новые закономерности.

держание отдельных элементов по сравнению с обычными звездами, что их даже так и принято называть в астрофизике: «магниевые», «кремниевые», «железные», «стронциевые», «углеродные» звезды. Недавно обнаружены даже «литиевые» и «фосфорные» звезды. Эти таинственные различия в составах звезд еще ждут объяснения.

Удалось проследить и удивительные механизмы образования новых ядер. Оказывается, что не только благодаря сверхвысоким температурам ядра обладают настолько высокой энергией, что способны преодолевать электростатическое отталкивание и реагировать между собой. Очень многие элементы таким путем вообще не могли бы образоваться.

Дейтерий, литий, бериллий, бор при высокой температуре, существующей внутри звезд, очень быстро реагируют с водородом и мгновенно разрушаются. Эти элементы в мироздании «варятся» в холодных «кухнях», возможно, на поверхности звезд в звездных атмосферах, где возникают мощные электрические и магнитные поля, ускоряющие частицы до сверхвысоких энергий.

Звездные «фабрики», где создаются элементы, ставят перед учеными странные загадки, связанные с таинственными частицами нейтрино. Ученые начинают подозревать, что роль этих неуловимых частиц-призраков далеко не так безразлична, как это казалось совсем недавно. Выяснилось, что возможны такие ядерно-химические процессы, при которых большая часть энергии, образующаяся в звезде, уносится не в виде излучения, а только с нейтрино.

Но для звезды это означает катастрофу. Звезда существует в состоянии равновесия благодаря давлению звездного газа и световому давлению, которые уравновешивают силы тяготения. Если же энергия начинает уноситься из внутренности звезды только с нейтрино, которые пронизывают толщи звездных тел без сопротивления, со скоростью света, то звезда мгновенно будет сжата силами гравитационного притяжения.

Быть может, так и образуются пока непостижимые звезды — белые карлики, плотность вещества в которых может достигать многих тысяч тонн на 1 $см^3$. Быть может, такие процессы дают начало и тем гигантским катастрофам, при которых рождаются Сверхновые звезды.

Но нет сомнения, что и эта одна из величайших тайн природы будет разгадана. Мы узнаем и тайну запасов водорода в звездах и в мировом пространстве, будут найдены процессы, ведущие к его образованию и к образованию «молодых» водородных звезд.

Вопрос о появлении Сверхновых звезд в мироздании исключительно важен. Должна быть решена за-

гадка, как рождается такое колоссальное количество энергии, которое способно разметать звезду и превратить ее в туманность. Именно это произошло, например, в 1054 г. В созвездии Тельца вспыхнула Сверхновая звезда и, затухая, превратилась в Крабовидную туманность.

В наше время эта туманность уже простирается на сотни биллионов (10^{12}) километров. Самое интересное — то, что вспышка Сверхновой звезды, постепенно угасая, теряет свою яркость так, как если бы она состояла из изотопа калифорния-254. Его период полураспада — 55 сут — точно совпадает с периодом уменьшения яркости Сверхновых звезд (см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов»).

Но, пожалуй, главная задача астрохимии — выяснить, как возникает во Вселенной водород. Ведь в бесчисленном множестве звездных миров происходит непрерывное уничтожение водорода, и его общие запасы во Вселенной должны убывать.

И многие ученые на Западе пришли к тяжелому и мрачному выводу о «водородной смерти» Вселенной. Они считают, что во Вселенной одна за другой гаснут звезды, исчерпавшие свои запасы водорода. И эти ранее ярко сиявшие светила одно за другим превращаются в холодные мертвые миры, которым суждено вечно носиться в космическом пространстве.

Мрачный вывод о «водородной смерти» Вселенной логически порочен и неверен. Он опровергается опытными фактами, достижениями науки наших дней — химии Вселенной.

Чудесные достижения науки, познакомившие нас с тайнами недоступных звезд, с их составом, природой, таинственными процессами, происходящими в их недрах, основаны на знаниях природы атома, его строения. Эти знания воплощены в Великом периодическом законе Менделеева. Но не следует думать, что периодический закон навсегда останется застывшим и неизменным. Нет, он и сам развивается, включая в себя все большее и большее содержание, все глубже и точнее отражая истину законов природы.

Закон периодичности свойствен и строению атомных ядер. Это позволяет надеяться на окончательное решение об относительной устойчивости элементов в мире и о составе всех небесных тел.

Очень много работы вам предстоит, молодые наследники великого Менделеева.

Кусок Луны (начало лунной химии)

Много лет назад, в 1609 г., Галилео Галилей впервые направил телескоп в небо. Лунные «моря» представились ему в обрамлении берегов из белого камня. После наблюдений Галилея еще долгое время думали, что лунные «моря» наполнены водой. Говорили даже, что на Луне жить приятнее, чем на Земле. Знаменитый астроном XVIII в. Вильям Гершель писал: «Что касается меня, то, если бы мне пришлось выбирать, жить ли на Земле или Луне, я, не колеблясь ни одной минуты, выбрал бы Луну».

Шло время. Сведения о Луне становились все точнее. В 1840 г. лунная поверхность была впервые отображена на фотопластинке. В октябре 1959 г. советская космическая станция «Луна-3» передала на Землю изображение обратной стороны Луны. И вот 21 июля 1969 г. на поверхности Луны отпечатался след человека. Американские космонавты, а затем и советские автоматические станции привезли на Землю лунные камни.

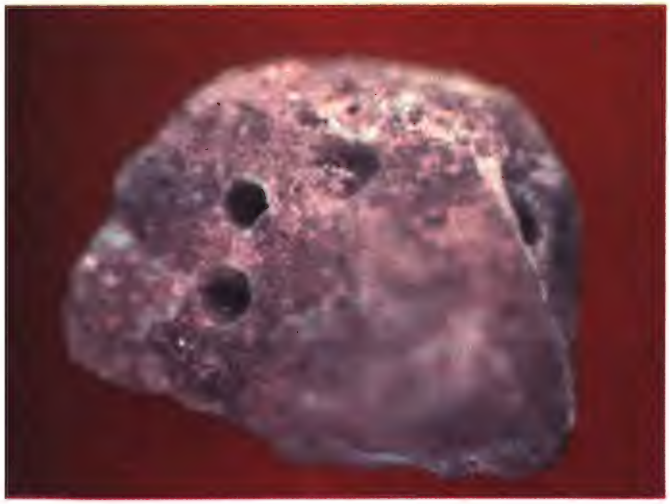
Лунные камни особенные — на их составе сказывается недостаток кислорода. Металлы не встречаются в их высших степенях окисления, железо встречается только двухвалентное. На Луне не было ни свободной воды, ни атмосферы. Все летучие соединения, возникшие при магматических процессах, улетели в космос, и вторичная атмосфера возникнуть не могла. Кроме того, на Луне процесс выплавления (образование коры) шел очень быстро и при более высоких температурах: 1200—1300° С, в то время как эти процессы на Земле шли при 1000—1100° С.

Луна все время повернута к Земле одной стороной. На ней в ясную ночь можно разглядеть темные пятна — лунные «моря», которые и открыл Галилей. Они занимают около трети видимой стороны Луны. Вся остальная ее поверхность — высокогорья. Причем на обратной, невидимой нам стороне «морей» почти нет. Породы, слагающие высокогорную обратную сторону ночного светила и «материки» видимой нам стороны, светлее, чем породы «морей».

На Луне нет длинных линейных хребтов, как на Земле. Там возвышаются кольцевые структуры — высокие (до нескольких километров) стенки громадных вулканических цирков — кратеров. Крупные кратеры, диаметром несколько километров, ведут свою родословную от вулканов. Их лава, излившись в пониженные места, образовала колоссальные ла-

Советский управляемый аппарат «Луноход-1».

На фотокарте Луны указаны места посадок автоматических станций «Луна-16», «Луна-20» и американских экспедиций «Аполлон» (корабли А-11, А-12, А-14, А-15, А-16).



вовые озера — это и есть лунные «моря». Многие кратеры диаметром меньше километра возникли, вероятно, при падении метеоритов или камней, поднятых взрывным вулканизмом Луны. Предположение это подтвердилось в 1972 г. На Луну упал метеорит и образовал новый кратер диаметром 100 м. Метеорит привел в действие сейсмические приборы, установленные на Луне. Это дает возможность определить мощность лунной коры и узнать о ее глубинном строении.

И лунные горы, и кратеры, и лунные «моря» образуют «лунный ландшафт». Очень возможно, что и Земля в раннюю эпоху своей геологической истории была изъедена кратерами и по ландшафту была похожа на теперешнюю Луну. Но мощные физико-химические процессы разрушения горных пород, присущие Земле, похоронили первичный рельеф под толщей осадков. Разрушение земных горных пород — выветривание — идет под воздействием воды, живых организмов, кислорода, углекислоты и других химических факторов, а также смены температур. На Луне нет атмосферы, нет воды, нет и организмов, а это значит, что процесс окисления, как и другие химические реакции, там почти отсутствует. Поэтому лунные породы в основном испытывают физико-механическое дробление, а земные, разрушаясь, претерпевают глубокую химическую перестройку. Лунные породы превращаются в пыль под влиянием резкой смены температуры между лунным днем и лунной ночью. На породы действует и галактическое излучение, и «солнечный ветер» — радиация Солнца. Нельзя забывать и метеориты, с огромной скоростью врезающиеся в поверхность Луны. В результате всех этих процессов на плотных породах Луны и возник слой мелкозернистого лунного грунта. Он мощным слоем покрывает «моря». Есть он и на поверхности высокогорных, материковых областей Луны.

Галактическое излучение примерно на метр проникает в тело Луны, и в породах под воздействием протонов происходят ядерные превращения. Благодаря бомбардировке протонами на Луне обычны радиоактивные изотопы (^{23}Al, ^{22}Na и др.), которых почти нет в земных породах. Есть и другие отличия. Например, в лунных породах содержится больше аргона, чем в земных. И еще одна химическая особенность — на Луне, по всей вероятности, нет месторождений полезных ископаемых. Дело в том, что для формирования рудных тел необходимы гидротермальные растворы, а свободной воды в толще Луны никогда не было. Зато некоторые лунные породы содержат около 10% титана.

Камни из космоса — метеориты знакомы людям давно. Но первые кусочки горных пород Луны попали к нам совсем недавно. Их доставили на Землю космонавты американских космических кораблей «Аполлон» и советские автоматические станции «Луна-16» и «Луна-20». Удивительно держать в руках кусок Луны! О лунном камне веками рассуждали ученые, его воспевали поэты, о нем столько написано! И только в наши дни человеку представилась исключительная возможность сравнить вещественный состав земных, метеоритных и лунных камней.

Каменные метеориты в основном сложены простыми силикатами, число минералов в них едва достигает сотни. В лунных же породах минералов немного больше, чем в метеоритах,— вероятно, несколько сотен. А на поверхности Земли открыто больше 3 тыс. минералов. Это говорит о сложности земных химических процессов по сравнению с лунными.

Тут уместно напомнить, что химический элементарный состав каменных метеоритов (хондритов) очень похож на состав Солнца. В каменных метеоритах и на Солнце практически одинаковы распространенность химических элементов и соотношения между ними (за исключением газов, которые при образовании метеоритов улетучились). Все химические элементы, обнаруженные на Солнце, найдены и в метеоритах. Кроме того, соотношение Si/Mg одинаково и на Солнце, и в метеоритах и близко к единице. Когда выяснилось, что камни, доставленные из лунных «морей», оказались фрагментами базальтовых

Частица анортозитовой породы, содержащая поры (вид под микроскопом). Размер частицы 3 мм.

На лотке в приемной камере проба лунного грунта, доставленного советской автоматической станцией «Луна-20».

Основные типы частиц (размер 0,5—1 мм) из грунта, доставленного станцией «Луна-16»: *1* — базальт; *2* — крупнозернистый базальт (габбро); *3* — анортозиты; *4* — однородные стекла и зерна минералов; *5* — стеклянные шарики; *6* — бурые стекла; *7* — брекчия (обломки пород и минералов, сцементированные тонкозернистым стекловатым материалом); *8* — спекшиеся частицы; *9* — шлаки и оплавленные частицы.

пород, стало ясно, что у лунной коры немало общего с Землей.

Базальты Луны, излившиеся при лунном вулканизме, несколько иного химического состава, чем хондриты. Так, соотношение Si/Mg в них равно не единице, а примерно 6 (как и в земных базальтах). Состав этих пород уже не соответствует первичному составу Солнца, однако они выплавились из лунного вещества, очень близкого к каменным метеоритам. Достаточно сказать, что средняя плотность Луны такая же, как каменных метеоритов, 3,34 г/см^3. Земля же имеет плотность более 5, а ведь земная кора в основном сложена базальтами. Значит, Луна, вероятно, лишена тяжелого железного ядра.

Итак, лунные «моря» сложены базальтовой лавой и покрыты мелкозернистым грунтом того же состава. Но в деталях одно «море» отличается от другого. Море Изобилия, например, состоит из базальтов, где титана около 3%, а в базальтах Моря Спокойствия титана до 10%. Он находится здесь в виде минерала ильменита. Морские лунные базальты богаты железом — до 18%, в земных же базальтах его обычно около 7%. В лунных базальтах по сравнению с земными повышенное содержание урана, тория и калия. Эти радиоактивные элементы и обусловливают лунный вулканизм.

В высокогорьях Луны преобладают не базальты, а другие породы, так называемые анортозиты, состоящие главным образом из минерала анортита — $Ca[Al_2Si_2O_8]$. На Земле такие породы встречаются среди самых древних пород на горных щитах. У земных анортозитов почтенный возраст — им до 3,5 млрд. лет. Все анортозиты, в том числе и лунные, содержат много алюминия и кальция и немного железа, ванадия, марганца, а также титан. А между тем в «морских» лунных базальтах содержание железа и титана весьма высокое.

Открытие способа образования лунных анортозитов прояснило бы земные геологические процессы далекого прошлого. Можно предположить, что анортозиты возникают при кристаллизационной дифференциации габбро-базальтовой магмы. На Луне анортозит кристаллизуется при очень быстром излиянии магмы в космическом вакууме. Все говорит о том, что для образования анортозита нужна вода и высокая температура. Лунная магма была горячей, однако есть признаки того, что в ней было мало летучих компонентов: воды, газов, углекислоты. Правда, такие летучие соединения могли легко уходить с Луны в космос.

В происхождении анортозитов еще много неясного, а между тем находка этих пород в лунных высокогорьях воскресила старые геологические идеи о первичной анортозитовой коре Земли.

Очень интересна концентрация никеля в породах Луны. В монолитных морских базальтах его мало. Но в грунте (измельченной породе) его на полпорядка больше. А анортозиты материковых областей Луны содержат много никеля не только в грунте, но и в кусочках породы. И самое интересное — в грунте было обнаружено распыленное металлическое железо, содержащее никель. По всей вероятности, это частицы металлической фазы метеоритов. Удалось рассчитать, что в лунном грунте находится 0,25% этого

Посадка возвращаемого аппарата автоматической станции «Луна-20». Февраль 1972 г.

железного сплава или 2,5% каменного метеоритного вещества. Это значит, что многие миллионы тонн вещества привнесены на Луну из космоса. С помощью лунных камней, доставленных на Землю, определили абсолютный «геологический» возраст нашего ночного светила. Оказалось, что Луне около $4{,}6 \cdot 10^9$ лет, т. е. она ровесница Земли. Вместе с тем отдельные кристаллические породы (главным образом базальты лунных «морей») на миллиард лет моложе: им около $3{,}0 \cdot 10^9$ лет.

Итак, человек прочно ступил на Луну...

Вымершие и воссозданные элементы

Около 10 млрд. лет назад в результате сжатия огромных масс галактического водорода повысилась его температура, создались условия для ядерных реакций — начался синтез элементов Солнечной системы. Тогда образовались не только изотопы, из которых ныне состоит Земля и которые искусственно созданы в лабораториях, но и атомные ядра, не изученные до сих пор.

Ученые еще совсем недавно считали, что нет никакой надежды обнаружить в Земле или в околоземном пространстве еще не открытые элементы, сохранившиеся со времени великого синтеза.

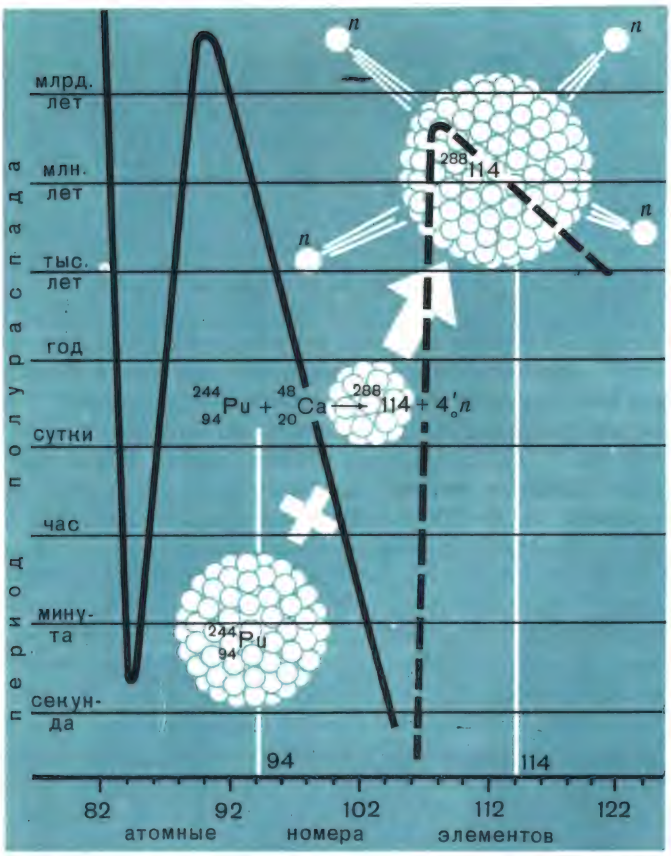
В самом деле, с увеличением атомного номера устойчивость к различным видам радиоактивного распада уменьшается; мощные электростатические силы, стремящиеся разрушить ядро, пропорциональны квадрату атомного номера и растут быстрее, чем силы, связывающие воедино ядерные протоны и нейтроны. Опыт подтверждает, что ядра с высокими атомными номерами самые неустойчивые по отношению к радиоактивному распаду.

Будет ли новый подъем?

Давайте внимательно посмотрим на таблицу Менделеева. У таллия (элемент № 81) и следующих за ним свинца и висмута есть изотопы с таким большим временем распада, что его практически невозможно измерить, так медленно он протекает. Но вот за висмутом идут полоний, астат, радон, франций... Все ядра элементов от полония до актиния превращаются в дочерние за очень короткое время. Зато периоды полураспада наиболее стабильных изотопов урана и тория, элементов с более высокими атомными номерами, 4,5 и 14 млрд. лет и сравнимы с возрастом нашей планеты. Нептуний, плутоний, америций, кюрий менее активны, чем полоний или радий, хотя их атомные номера значительно выше. Таким образом, время жизни элементов уменьшается нерегулярно с ростом атомного номера. После висмута — спад, подъем в области торий — уран и новый спад за ураном. У самого долгоживущего изотопа плутония период полураспада 70 млн. лет, у кюрия — 15 млн. лет... Искусственные изотопы 102-го элемента переходят в ядра фермия в лучшем случае за минуты, а время жизни изотопа курчатовия, открытого в 1964 г., всего 0,5 с. Существует ли новый подъем времени жизни?

Магические числа

В начале 30-х годов XX в., когда ядерная физика делала первые шаги, была замечена странная закономерность: атомные ядра, содержащие определенные числа протонов или нейтронов, отличались от соседних повышенной стабильностью. Это подтверждалось, в частности, и большей их распространенностью в природе. Так, например, кальций, олово, свинец встречаются в значительно больших концентрациях, чем их соседи по таблице Менделеева. В те времена физики не понимали, почему наблюдается такая зависимость, и в шутку назвали эти числа магически-



Зависимость периода полураспада наиболее стабильных изотопов от атомного номера элемента.

ми. Позднее и атомные ядра с магическим числом протонов или нейтронов стали называть так же.

Только в 1948 г. Мария Гёпперт-Майер опубликовала статью, теоретически объясняющую существование магических чисел.

Оказалось, что, как и атомные электроны, нуклоны в ядрах образуют оболочки. Природа строения ядерных оболочек совсем иная, но наиболее стабильны те ядра, у которых полностью застроены нейтронные и протонные оболочки. А таким «замкнутым» оболочкам как раз и соответствуют магические числа нейтронов или протонов: 2, 8, 20, 50, 82, 126.

Новое слово — «сверхэлемент»

Теоретические расчеты последних лет показали, что, по-видимому, существуют и другие магические числа. Это прежде всего протонное число 114 и нейтронное 184. Эти числа получены только теоретическим расчетом. Ядра с таким числом нейтронов и протонов должны обладать повышенной стабильностью по сравнению с соседними изотопами. Именно здесь и можно ожидать нового подъема времени жизни далеких элементов. Гипотетические элементы с числом нейтронов или протонов, равным или близким к 114 или 126, и числом нейтронов 184 назвали *сверхэлементами*, а область значений атомных номеров и массовых чисел, им соответствующую,— новой областью относительной стабильности. Почему новой? Вероятно, потому, что область тория и урана можно считать старой. Слово «относительной» указывает на то, что сверхъядра в общем-то нестабильны.

Перед физиками-теоретиками встают очень большие трудности, когда требуется предсказать свойства атомных ядер таких элементов, как 110-й или 114-й. Задача сложна уже потому, что еще не удалось разгадать до конца природу сил, «цементирующих» воедино нейтроны и протоны в ядре. Поэтому физик, рассчитывающий устойчивость атомного ядра, находится в положении игрока в шахматы, не знающего до конца правил игры. А надо сыграть гроссмейстерскую партию! Задача расчета системы многих тел — ядерных протонов и нейтронов — сложна сама по себе. Если бы даже было известно все о ядерных силах, решение найти совсем непросто. Пример тому — электронные оболочки сложных атомов. Хотя известны все силы, действующие на атомные электроны, получаются настолько сложные уравнения, что приходится ограничиваться приближенным решением, не дающим детального описания движения атомных электронов.

Однако помогает анализ уже сыгранных партий — анализ характеристик изученных атомных ядер. На основе экспериментальных данных и оценивается возможное время жизни сверхэлементов.

По одной из таких оценок самыми стабильными должны быть изотопы 108-го и 110-го (а не 114-го) элементов с числом нейтронов, близким к новому магическому числу 184. Расчетный период полураспада этих изотопов равен примерно 100 млн. лет. Поэтому не исключена возможность, что такие ядра еще таятся в земных недрах со времени синтеза элементов Солнечной системы.

Космические сверхъядра

Первые указания о существовании сверхэлементов были получены в экспериментах, посвященных изучению ядерных частиц, падающих на Землю из космоса.

Процессы, подобные синтезу элементов Солнечной системы, непрерывно протекают в далеких звездных мирах. Поэтому не исключено, что в потоках космических частиц могут быть и тяжелые ядра.

Дно океана равномерно усеяно конкрециями. Быть может, именно в них и содержатся следы сверхэлементов.

Положение сверхэлементов в таблице Менделеева.

Чтобы подтвердить это предположение опытным путем, английский ученый П. Фаулер (внук Э. Резерфорда) предложил облучать космическими лучами большие поверхности, покрытые фотоэмульсией, которая способна регистрировать атомные ядра. Ядра эти летят со скоростью, близкой к скорости света. Заряд космического атомного ядра можно определить, если ядерная частица не затормозилась в плотных слоях атмосферы. Поэтому гигантские фотопластинки площадью около 10 м^2 с помощью стратостата, наполненного гелием, приходилось поднимать на высоту 40 км. Объем стратостата достигал 600 000 м^3. Чем больше заряд ядра — атомный номер элемента, тем шире оставленный им в фотоэмульсии след. Довольно часто сотрудники Фаулера обнаруживали сравнительно тонкие следы. Это были треки 26-го элемента — железа. Иногда встречались и «жирные» следы-треки. Их изучение приводило к выводу — это следы ядер элементов с номерами 80—90. И совсем в редких случаях встречались очень широкие треки, которые, как оказалось, могли принадлежать атомным ядрам элемента с порядковым номером около 110! Такие сверхъядра могли родиться в области нейтронных звезд или при взрыве Сверхновых звезд.

Но важно другое. На путь от далеких звездных миров до Земли эти ядра должны были затратить миллионы лет, и если бы их период полураспада оказался мал по сравнению с этим временем, то они бы распались, не достигнув нашей планеты.

Поэтому из факта обнаружения в космических лучах сверхъядер можно было бы заключить: существуют сверхъядра с временем жизни около нескольких сотен тысяч лет, потому что в этом случае примерно тысячная доля таких ядер не успела бы распасться и дошла до Земли.

Космос и дно Океана

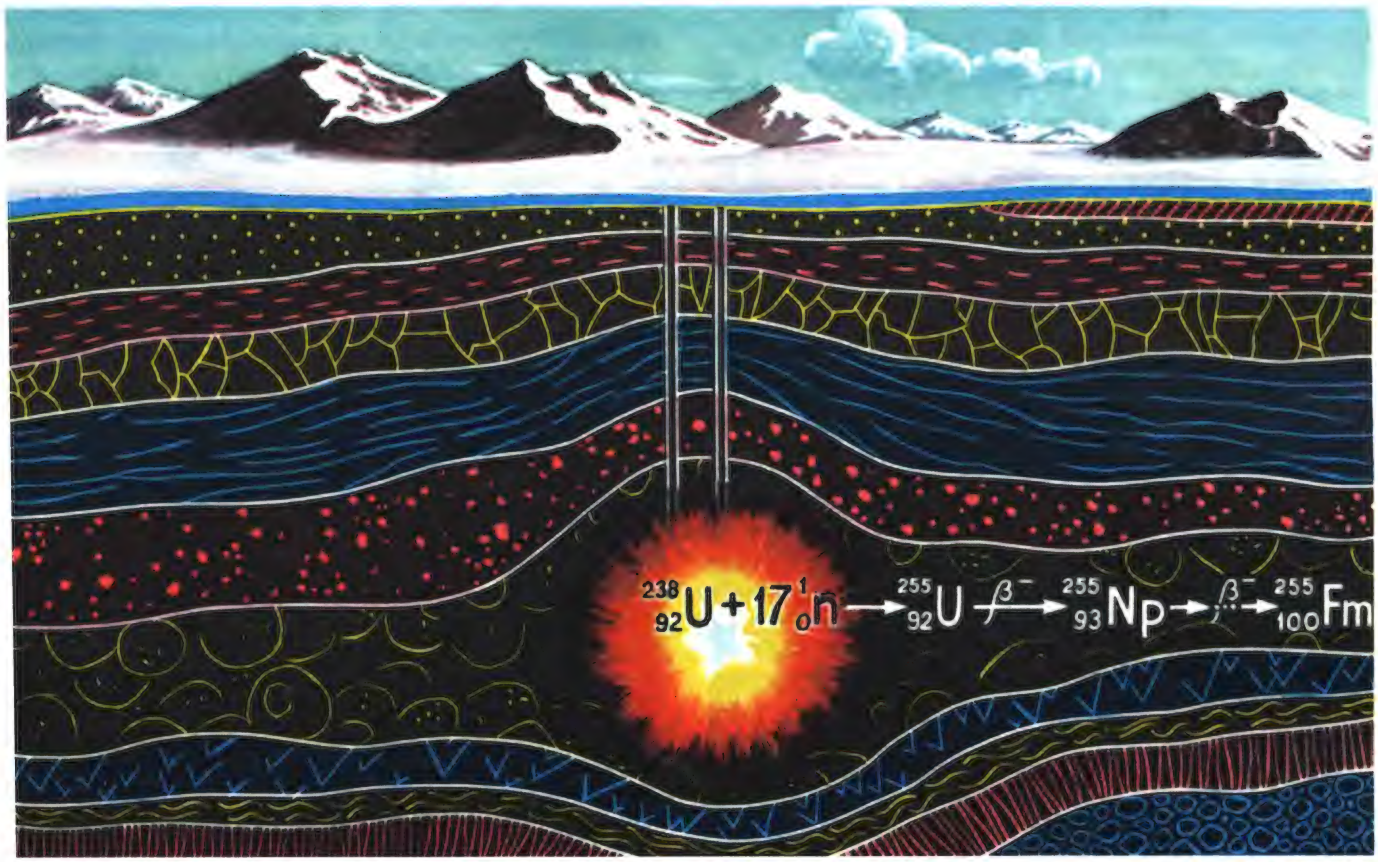
Изучить ядерные свойства космических сверхэлементов сложно не только потому, что они летят со скоростью, близкой к скорости света, но и потому, что поток этих ядер очень и очень мал. За несколько суток на 1 м^2 поверхности Земли падает всего одно ядро. На весь земной шар выпадает менее 0,1 мг в сутки. Попробуйте найти эти доли миллиграмма среди миллиардов тонн обычных элементов!

Хорошо, если бы в течение миллионов лет сверхъядра неподвижно лежали бы тончайшим слоем на поверхности. Тогда, собрав небольшую массу вещества, но со значительной площади, можно получить высокую концентрацию космических ядер. Но дожди, ветры, Солнце непрерывно совершают на Земле работу и перемешивают поверхностный слой. А как на Луне? Там нет атмосферы и незаторможенные космические частицы проникают в лунную твердь.

А вот на дне Океана, на больших глубинах царит покой. Там слабы течения, нет солнечного света. Толщина отложений из верхних слоев Океана невелика. И сама природа помогает в поисках. Ровное океаническое дно усеяно круглыми, напоминающими выкопанный из влажной земли картофель, образованиями. Это конкреции. Как получаются такие «картошки» на глубине в несколько тысяч метров, ученые пока не знают, но им известно: возраст этих образований сотни тысяч лет, и все эти годы конкреции как бы впитывают в себя соединения, содержащие атомы металлов. Поэтому концентрация марганца, железа, свинца в них значительно выше, чем в остальной породе спокойного океанического дна. Сверхэлементы — металлы — также накапливаются в океанической «картошке». Предполагают, что на тонну конкреций приходится гораздо больше атомов сверхъядер, чем в среднем на такую же массу обычного грунта, поднятого со дна океанских впадин.

Поиск в конкрециях самопроизвольно делящихся ядер — один из путей, на котором, может быть, удастся найти гигантские ядра, осевшие в океанских глубинах. Для этого нужно добыть несколько десятков тонн этих природных поглотителей металлов, размолоть их шаровыми мельницами, на химическом заводе извлечь из полученного сырья все фракции тяжелых элементов и поместить в объем счетчиков осколков деления. Так, осмий, иридий, платину, золото, ртуть, таллий, свинец можно осадить из растворенного вещества конкреций, пропустив через раствор сероводород (предварительно такой раствор

^{55}Cs	^{56}Ba	57 – 71 лантан и лантаноиды	^{72}Hf	^{73}Ta	^{74}W	^{75}Re	^{76}Os	^{77}Ir	^{78}Pt
^{79}Au	^{80}Hg	^{81}Tl	^{82}Pb	^{83}Bi	^{84}Po	^{85}At			^{86}Rn
^{87}Fr	^{88}Ra	89 – 103 актиний и актиноиды	^{104}Ku	105	106	107	108	109	110
111	112	113	114	115	116	117			118



Подземное термоядерное устройство и схема распада урана-255. В результате термоядерного взрыва (он длится меньше миллионной доли секунды) глубоко под землей образуется большая полость, сдвигаются земные пласты, происходит перемешивание земных пород. В течение некоторого времени давление раскаленных газов поддерживает своды полости. Затем своды обрушиваются и образовавшиеся трансураны перемешиваются с пустой породой. На тысячу тонн породы приходится не более грамма синтезированных элементов.

нужно очистить от железа и марганца). Этим элементам будут сопутствовать и спонтанно делящиеся ядра экаосмия (108-й элемент), экаплатины (110-й элемент), экасвинца (114-й элемент). Помещенные в счетчик осколков вместе со стабильными тяжелыми элементами, эти ядра будут обнаружены по их самопроизвольному делению. Тогда по скорости спонтанного распада сверхъядер на ядра-осколки экспериментаторы смогут судить об их количестве, добытом с океанского дна.

Из космоса на Землю

Возвратимся теперь к земным изотопам. Напомним — теоретические расчеты предсказывают для самых стабильных сверхъядер периоды полураспада, близкие к 100 млн. лет.

Поэтому определим долю первозданного элемента, оставшуюся в условном «самородке» массой 1 кг,

состоявшем 5 млрд. лет назад из чистого изотопа 108-го элемента, предполагая, что период полураспада изотопа этого сверхэлемента равен 100 млн. лет.

Как гласит древнее предание, великий магараджа предложил изобретателю шахмат выбрать награду себе за труды. Мудрец попросил, казалось бы, совсем немного зерна: столько, сколько придется на 64-ю клетку шахматной доски, если на первую положить два зерна (2^1), на вторую четыре (2^2), на третью восемь (2^3)... и так удваивать до 64-й клетки. Но после простого подсчета стало ясно, что на последнее шахматное поле придется отгрузить зерна намного больше годового урожая всей Индии!

Распад ядер подчиняется обратному закону. Природа поместила наш самородок на пятидесятую клетку доски и каждые сто миллионов лет перекладывала его на соседнюю — с меньшим номером и половинной массой сверхэлемента. Всего этот процесс занял 5 млрд. лет, а в самородке сохранилась только одна десятимиллионная доля первозданного вещества. Можно ли обнаружить такие концентрации современными методами анализа?

Сверхтяжелые ядра распадаются, как правило, на два ядра-осколка, разлетающиеся с очень большой скоростью, так что их энергия в десятки миллионов раз больше энергии, выделяющейся на один элементарный акт любой экзотермической химической реакции. Поэтому удается наблюдать единичные распады делящихся ядер. В нашем самородке за сто суток в среднем будет наблюдаться четыре распада. Конечно, обнаружить сверхъядра по этим распадам невозможно. Они будут замаскированы самопроизвольным делением атомов примесного урана, делением тяжелых элементов космическими лучами да и просто помехами, возникающими в самой измерительной аппаратуре. Практически установлено — современные методы регистрации позволяют отыскать спонтанно делящийся изотоп, если на килограмм вещества происходит один распад в сутки. Так что атомные ядра с периодом полураспада 100 млн. лет можно обнаружить, если их концентрация была бы в 25 раз выше, чем получившаяся в самородке после распада. Это условие выполняется, если теоретики ошиблись только на 10% и сверхэлемент распадается наполовину не за 100, а за 110 млн. лет. Ошибка в расчетах в ту или другую сторону значительно больше, и только эксперимент может дать окончательный ответ на вопрос, сохранились ли в Земле элементы с атомными номерами больше 100. Где искать эти элементы?

Обратимся к таблице Менделеева. По своему химическому поведению все трансурановые элементы начиная с америция близки к элементам редкоземельного ряда. Открытие в Дубне 104-го элемента — курчатовия и его изучение подтвердили предположение, что это сходство должно кончаться на 103-м элементе, а курчатовий — химический аналог гафния. Теперь очень надежно предсказываются свойства более далеких, еще не открытых элементов. Так, у 108-го элемента химические свойства должны быть близкими к свойствам осмия, у 110-го — к свойствам платины, а 114-й должен быть аналогом свинца: экасвинцом назвал бы его Менделеев. Поэтому, весьма вероятно, в процессе формирования земной коры и уже после того, как она образовалась, атомы сверхплатины должны сопутствовать атомам платины и содержаться в платиновых рудах, а атомы экасвинца — 114-го элемента — в свинцовых. Чтобы найти новые элементы с большими атомными номерами, нужно исследовать руды, которые содержат осмий, платину, золото... свинец. Нужно попытаться обнаружить спонтанно делящиеся излучатели в этих рудах.

Но есть и другой путь. Осколки ядер оставляют в веществе, в котором происходят деления, следы. Эти следы очень невелики по размерам — всего несколько атомных диаметров. Наблюдать такие небольшие объекты можно только с помощью электронного микроскопа. Это очень и очень сложно. Главная трудность в том, что площадь, просматриваемая в электронный микроскоп за один прием, очень невелика. Поэтому, чтобы просмотреть площадь только в 1 $см^2$, требуется большое время. Однако физики нашли выход. Если поверхность слюды или стекла обработать специальными растворами, то в местах, где внедрились осколки, образуются довольно большие — в несколько микрометров — лунки, напоминающие лунные кратеры. Такие лунки можно быстро найти с помощью обычного оптического микроскопа.

Займемся теперь свинцовыми стеклами. Со свинцом в стекле может находиться и изотоп экасвинца — 114-го элемента. Если бы ядра экасвинца делились самопроизвольно, то осколки оставляли бы свои следы. Казалось, что после обработки поверхности стекла раствором плавиковой кислоты можно обнаружить следы сверхэлементов в свинце, когда-то добавленном в стекло. Преимущество такого способа в том, что увеличивается время эксперимента. Так, если взять стекло, сваренное 200 лет назад, то это значит, что и «опыт» по регистрации ядер экасвинца длился 200 лет. Даже ничтожные примеси за такое длительное время могли бы быть обнаружены.

К сожалению, нельзя брать более древние стекла. В них нет свинца. Технология свинцовых стекол

была разработана в Англии примерно 200 лет тому назад, поэтому самый древний предмет, использованный физиками для анализа,— осколок английской вазы XVIII в., хранящийся в Ленинградском Эрмитаже.

Возрождение ядерных «бронтозавров»

Но ведь есть путь, не связанный с поисками природных сверхэлементов. Из 1800 изученных в наши дни атомных ядер большинство получено искусственно. Вряд ли можно поверить, что когда-либо в будущем в лаборатории биолога удастся возродить мамонта или бронтозавра. Возрождение же ядер, «вымерших» за миллиарды лет до появления на Земле жизни, осуществляется во многих лабораториях мира.

Чтобы попасть в область сверхэлементов, необходимо перешагнуть через несколько клеток таблицы Менделеева. Можно, например, бомбардировать плутоний ядрами кальция. В этом случае получатся атомы 104-го элемента. И здесь мы сталкиваемся с новой проблемой. Дело в том, что ядра любого элемента стабильны (или относительно стабильны) только тогда, когда в них содержатся вполне определенные числа нейтронов и протонов. Так, очень стабильно ядро свинца, содержащее 82 протона и 126 нейтронов.

Но вот число нейтронов возросло на единицу, и новый изотоп свинца со 127 нейтронами будет распадаться наполовину всего за 3,3 ч. А ведь ядра соседнего свинца-208 настолько стабильны, что еще никому не удавалось наблюдать их распад. Стоило отойти только на один шаг от нейтронного магического числа 126, как ядро потеряло свою устойчивость.

Теоретики предсказывают, что то же самое должно происходить и с ядрами еще не открытых элементов. По их расчетам магическое нейтронное число, следующее за числом 126, равно 184. И вот оказывается, если в атомном ядре 110-го элемента 182 нейтрона, то его время жизни должно быть меньше в 10 млн. раз, чем время жизни магического ядра этого же элемента. Число нейтронов изменилось на один процент, а время жизни в 10 млн. раз! Поэтому, чтобы получить долгоживущие атомы сверхэлементов, нужно синтезировать ядра, близкие к магическим.

А это и есть самое трудное. Теми методами, которыми располагают физики в наши дни, получаются ядра, содержащие гораздо меньшее число нейтронов.

Так, бомбардируя ускоренными ядрами серы тяжелый плутоний, получим:

$$^{244}_{94}\mathrm{Pu} + ^{32}_{16}\mathrm{S} \longrightarrow ^{276}110.$$

Целых 18 нейтронов не хватает в образовавшемся в такой реакции ядре 110-го элемента до обеспечивающего наибольшую стабильность числа 184. А ведь в реакции участвовали самые богатые нейтронами стабильные ядра плутония и серы. Это не частный пример. Всегда при слиянии двух сложных атомов можно синтезировать ядра сверхэлементов только с нейтронным числом, значительно меньшим, чем магическое. Атом, наиболее близкий к нейтронному магическому ядру, можно получить на самом мощном ускорителе тяжелых ионов, действующем в Лаборатории ядерных реакций в Дубне, если тяжелый изотоп плутония облучать ускоренными ядрами кальция, обогащенными нейтронами. Получится ядро 114-го элемента, всего лишь на 8 нейтронов отличающееся от дважды магического.

Снова звезды

Как найти пути к ядрам с большим числом нейтронов? Известно, что в интенсивных потоках нейтронов могут образовываться ядра новых элементов. Так, в нейтронных потоках при термоядерных взрывах были получены впервые эйнштейний и фермий. И в нейтронных потоках всегда получаются ядра, богатые нейтронами. Может быть, это и есть верный путь синтеза далеких сверхэлементов?

Посмотрим, как получаются новые элементы в процессе термоядерного взрыва. Устройство с термоядерной взрывчаткой заложено глубоко, метров на триста, под землей. Там же и мишень — ядра урана. Сработало взрывное устройство. Всего около одной миллионной секунды длился взрыв, но за это время ядра урана успели захватить по 17 нейтронов. Получился уран-255! Такое ядро неустойчиво и испытывает длинный ряд последовательных β^--распадов, пока не образуется ядро фермия — 100-го элемента. Однако, чтобы превратиться в 110-й элемент, ядро урана должно захватить 56 нейтронов. Но для этого нужны длительные и очень интенсивные нейтронные потоки, недоступные в земных установках. В некоторых случаях это возможно лишь в звездных процессах.

Созидание разрушением

Существует еще один метод получения новых ядер. Обычно разрушение не приводит к созиданию. Но бывают исключения. Одно из них — деление ядер. Известно, что при делении урана в нейтронных потоках ядерного реактора синтезируются существующие в природе лишь в ничтожных концентрациях элементы технеций и прометий. На 1 кг осколков деления урана-235 приходится около 7 г технеция. Еще более удивительные открытия сделали ученые за последние годы. Изотоп калифорния (элемент № 98) делится спонтанно с периодом полураспада всего 66 лет. И вот среди осколков деления его атомов были обнаружены удивительные ядра гелия. Одно из них было в полтора раза, а другое в два тяжелее обычных. Дело в том, что в процессе деления калифорния образовались ядра, насыщенные нейтронами: гелий-6 и гелий-8.

А если урановая мишень бомбардируется ускоренными ядрами урана?

$$^{238}\mathrm{U} + {}^{238}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{476}184 \longrightarrow {}^{166}_{70}\mathrm{Yb} + {}^{298}114 + 12\,{}^{1}_{0}n.$$

Среди осколков таких ядерных реакций могут оказаться и ядра сверхэлементов с близким к магическому числом нейтронов. Но физики пока только могут мечтать о таких опытах. Пока самый мощный в мире циклотрон, построенный в Дубне, ускоряет ядра не тяжелее кальция до энергий, при которых уже происходит слияние кальция с тяжелыми ядрами. Ускорить же уран можно только на очень большом циклотроне, с диаметром полюсных наконечников его магнита более 8 м. Инженеры и ученые не видят принципиальных трудностей, которые могли бы встретиться при создании такой, в общем-то очень сложной машины. Однако на разработку проектов, постройку гигантской «фабрики» быстрых атомных ядер необходимо затратить немало усилий, а значит, и времени.

Для чего создают и изучают атомные ядра

Ответить и просто и сложно. Синтез новых атомных ядер позволяет глубже понять строение атомного ядра. Особенно важно синтезировать «предельные» атомные ядра, содержащие максимальное число либо протонов, либо нейтронов. Именно такие ядра, распадаясь, многое рассказывают о себе, раскрывают свои внутренние связи. Как изучение вещества в условиях очень высоких и очень низких предельных температур и давлений дали очень много физике, так и ядра, обедненные и обогащенные нейтронами, помогут понять строение атомного ядра.

В будущем, и не таком уж далеком, ученым удастся возродить еще несколько тысяч ядерных «бронтозавров и мамонтов», среди которых будут и сверхъядра 110-го, 114-го, а может быть, и более далеких элементов. Синтез и изучение таких «объектов» помогут физикам глубже понять структуру ядерного вещества, а это, в свою очередь, создаст широкие практические возможности применения всех ядерных исследований. Следует помнить, что практически вся масса вещества, а значит, и энергии ($E = mc^2$) сосредоточена в атомных ядрах.

На краю таблицы Менделеева

Незримую грань, отделявшую 101-й элемент — менделевий от соседнего 102-го, еще не имеющего названия, физики преодолевали почти одиннадцать лет. Это была трудная задача. Потребовались новые атомные машины — ускорители, новые методы изучения атомных ядер и тысячи часов напряженной работы, чтобы открыть 102, 103, 104, 105-й...

Чтобы получить новый элемент, нужно повысить заряд ядра какого-либо известного тяжелого элемента. Существует много способов изменения заряда ядра. Обстреляем изотоп ${}^{242}_{94}\mathrm{Pu}$ нейтронами. Ядро этого элемента после захвата нейтрона превратится в изотоп того же плутония с массой 243 атомных единицы. Такое ядро само повышает свой заряд, испуская электрон — β-частицу, и становится ядром америция — 95-го элемента.

В атомных реакторах с интенсивным потоком нейтронов так получают все элементы, вплоть до 99-го — эйнштейния. По-видимому, удастся получить и весьма малые количества фермия. Однако к элементам с большими порядковыми номерами такой путь закрыт.

Дело в том, что все изотопы элементов с атомным номером, большим 99, очень быстро распадаются, а процесс захвата нейтронов даже в самых мощных реакторах требует длительного времени. Это десятки дней, а то и многие месяцы. Можно сказать, что ядра изотопов уже 100-го элемента гибнут в нейтронном потоке, не успев родиться. Американские ученые пытались добыть новые элементы в громадных нейтронных потоках, возникающих при подземных термоядерных взрывах, но без успеха.

Есть другой путь: сливать воедино два атомных ядра. Тогда заряд получающегося при этом «слитка» будет равен сумме зарядов ядер. Так был получен менделевий:

$$^{253}_{99}\mathrm{Es} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{256}_{101}\mathrm{Md} + {}^{1}_{0}n.$$

Простая арифметика, но на деле явление оказывается сложным. Прежде всего слияние таких ядер может произойти, если они сближаются при очень большой скорости, потому что между ядрами действуют силы электромагнитного отталкивания — у ядер заряд одного знака. Только на очень малых расстояниях между ядрами, когда они уже соприкасаются поверхностями, начинают действовать мощные ядерные силы притяжения. Тогда-то и происходит слияние ядер.

В обычных условиях ядра не взаимодействуют. Ядра гелия должны лететь со скоростью 10 000 км/с, чтобы достигнуть поверхности тяжелых ядер эйнштейния. Таких быстрых ядер в природе не бывает. Их получают физики на специальных машинах — ускорителях. Однако и быстрый гелий не поможет, если цель — ядра 102-го элемента. Дело в том, что из 100-го элемента не изготовишь мишень, которую можно бомбардировать ускоренными частицами. Фермий пока получают в очень малых количествах, да если бы его было и больше, с фермиевой мишенью трудно работать — скорость распада его изотопов очень велика и радиоактивность мишени из этого материала была бы чрезмерно большой. Если же взять элементы с меньшим атомным номером, то, сливаясь с ядрами гелия, ядра мишени образуют элемент с атомным номером меньше 102.

Поэтому 102-й элемент и последующие элементы пришлось получать по-новому. Потребовались ускоренные пучки тяжелых ионов, у которых заряд ядер больше двух. В Лаборатории ядерных реакций в Дубне был построен самый мощный ускоритель тяжелых ионов — специальный циклотрон. На этом циклотроне ускоряют кислород, неон, аргон, цинк... Зал циклотрона — огромное помещение, почти не уступающее по размерам залу Большого театра. Диаметр полюсов магнита 310 см, а масса 2200 т. Все остальные узлы и детали циклотрона под стать размерам магнита. По его многотонной обмотке протекает ток силой 2000 А. Мощность высокочастотного генератора, питающего циклотрон, 500 кВт. Напряжение между высокочастотными электродами — дуантами — 260 кВт. В центре циклотрона ионный источник. Из этого сложнейшего устройства ионы начинают свой путь к мишени.

Нелегко отработать все узлы циклотрона так, чтобы получить интенсивные пучки быстрых ионов, обрушивающихся на мишень. Работа ионного источника высокочастотного генератора, вакуумных насосов, стабилизация тока магнита — все это должно быть безупречным.

На циклотроне в Лаборатории ядерных реакций были получены самые интенсивные в мире пучки ускоренных тяжелых ионов. Мощности пучков кислорода, неона, аргона в сотни раз превосходят мощности, достигаемые в самых лучших американских ускорителях. Это упрощало задачу, но все же получить и изучить ядра 102, 103, 104 и 105-го элементов было чрезвычайно сложно.

Посмотрим, что происходит, когда сливаются ядро изотопа неона-22 и ядро урана-238:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} \longrightarrow {}^{260}102.$$

В получившемся «слитке» 102 протона (сумма зарядов неона и урана), а его масса равна $238 + 22 = 260$ атомным единицам. Такой ядерный слиток называют *составным ядром*. Составное ядро ведет себя как капля жидкости. Такая капля ядерного вещества неустойчива — в ней содержится избыток энергии, внесенной тяжелым «снарядом» — ядром неона. Поэтому составное ядро деформируется, начинает совершать колебания и затем делится на ядра-осколки. Нового элемента не возникает... К счастью, из правила бывают исключения. Так, в одном из ста миллионов случаев составное ядро $^{260}102$ «испаряет» один за другим 4 нейтрона, отдает с ними избыток энергии и остается жить. Нейтроны не имеют заряда, и их потеря не сказывается на атомном номере, только масса рожденного ядра будет на четыре единицы меньше суммы масс неона и урана. В процессе образования ядер 102-го элемента лишь одна стомиллионная доля прореагировавших ядер становится атомами этого элемента. Поэтому нелегко обнаружить среди осколков деления ядра 102-го элемента.

Было поставлено множество опытов по синтезу элемента № 102. И только в 1966 г. на циклотроне в Дубне получили неопровержимое доказательство синтеза этого неуловимого элемента. В опытах плутониевая мишень облучалась кислородом. Под действием импульса тяжелого иона изотопы вновь

Рис. 1. Схема опыта получения элемента № 104 (или 105): *1* — мишень; *2* — фольга-подложка; *3* — лента-конвейер.

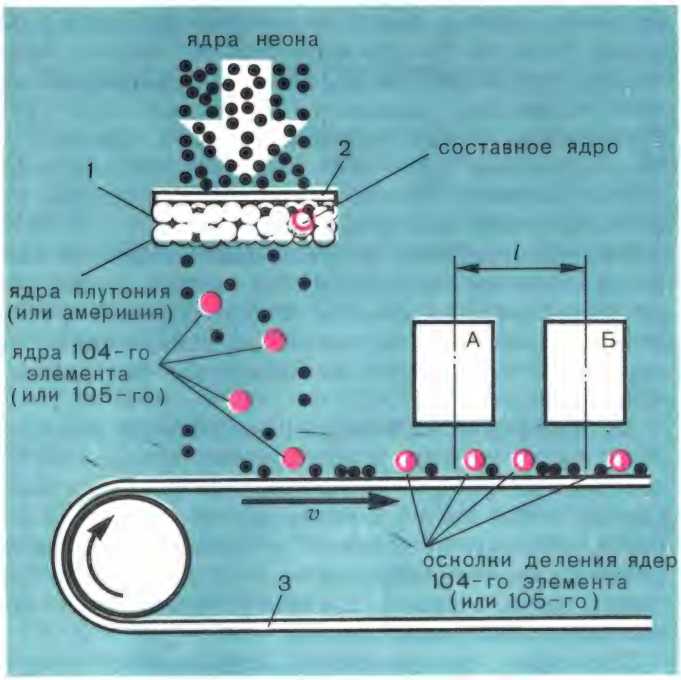
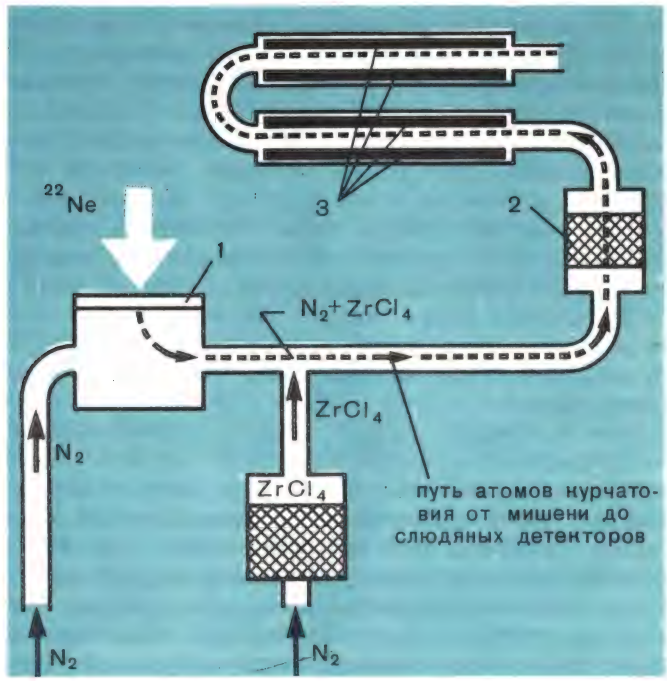


Рис. 2. Схема исследования химических свойств элемента № 104: *1* — мишень; *2* — фильтр, задерживающий актиноиды; *3* — слюдяные детекторы.



родившегося элемента вылетали из мишени, тормозились в газе и с газовой струей поступали на металлический сборник. Сборник «подносил» атомы 102-го к приборам. Ядра 102-го элемента испытывают радиоактивный распад и при этом испускают α-частицы. Приборы регистрируют α-частицы и измеряют их энергию. По скорости распада и энергии α-частиц физики и отличают атомы 102-го элемента от других, рождающихся в побочных ядерных реакциях. Бомбардируя уран неоном, физик получает не только ядра 102-го элемента, но и множество ядер-осколков с малыми атомными номерами. Иногда неон отдает урану лишь часть своих нуклонов (нейтронов и протонов), и тогда образуются ядра 100, 99, 98-го элементов. Но из ядер 102-го вылетают α-частицы, характерные только для него; они-то и рассказывают физику о свойствах нового элемента. Таким же способом, изучая α-распад нового элемента, в Дубне удалось открыть 103-й элемент.

Обнаружить новый элемент можно не только по испускаемым им α-частицам, но и по другому виду распада — *спонтанному делению*, когда атомное ядро делится на две примерно равные части. Энергия ядер-осколков во много раз больше энергии α-частиц. Энергичные осколки деления обнаружить значительно проще, чем α-частицы. Поэтому первые атомы 104-го и 105-го элементов были открыты в Лаборатории ядерных реакций по их самопроизвольному делению. На рисунке 1 изображена схема получения и регистрации ядер 104-го и 105-го элементов. На мишень *(1)* падает пучок быстрых ядер неона. Пройдя алюминиевую фольгу-подложку *(2)*, неон проникает в плутониевый (если получают элемент 104) или америциевый (если получают элемент 105) слой. Там ядро-снаряд и ядро-мишень сливаются в составное ядро. Только одно из десяти миллиардов составных ядер становится атомом нового элемента, остальные делятся на осколки. Импульс, внесенный неоном, выносит ядро нового элемента на движущуюся никелевую ленту-конвейер *(3)*. Теперь ядра нового элемента движутся вместе с лентой. Ядро 104-го или 105-го элемента должно делиться, но не мгновенно, а через какое-то время после своего рождения. За это время никелевая лента успевает перенести атомы к регистраторам осколков. Такими регистраторами могут быть ионизационные камеры *А* и *Б*. Ядра нового элемента все время делятся на ленте. Поэтому мимо ионизационной камеры *Б* лента всегда пронесет меньшее число новых ядер, чем мимо камеры *А*, и число разделившихся и зарегистрированных у камеры *А* ядер будет большим, чем у *Б*. Допустим на счетчике, соединенном с камерой *А*, зарегистрировано 40, а на счетчике, соединенном с камерой *Б*, 20 импульсов. Если скорость ленты v, а расстояние между ионизационными камерами l, то от камеры *А* до камеры *Б* ядра нового элемента транспортируются за время $t_0 = \frac{l}{v}$.

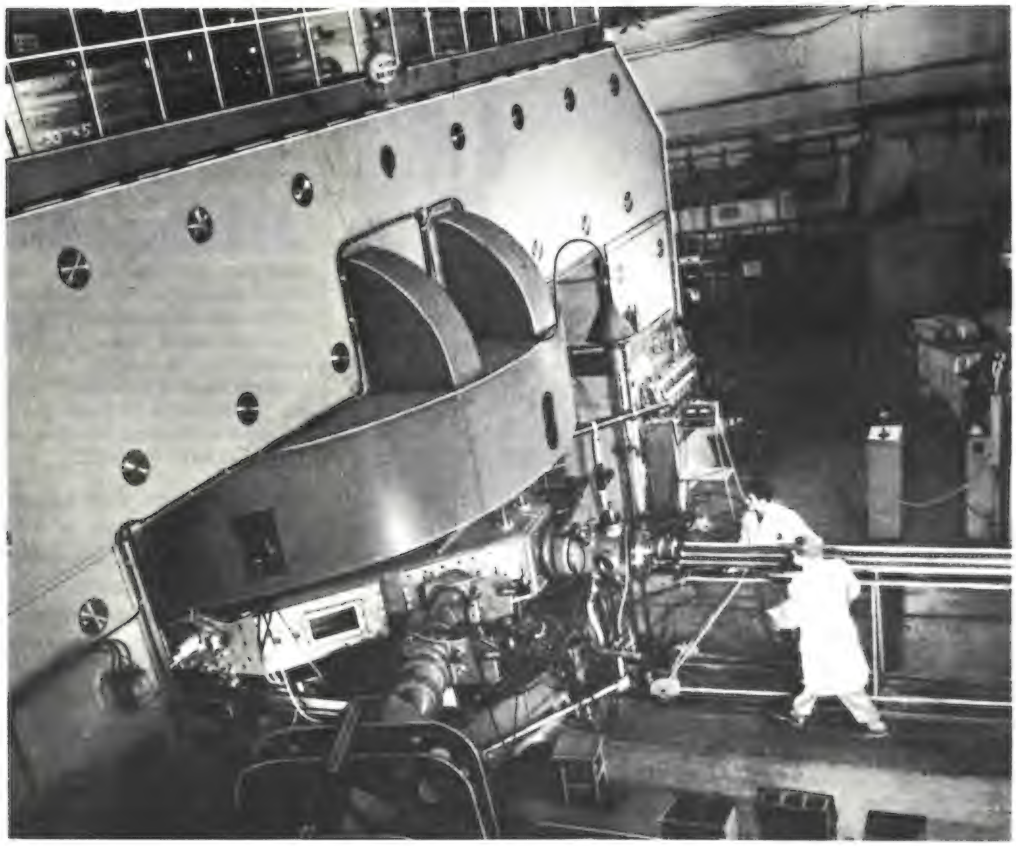


Рис. 3. Крупнейший действующий ускоритель многозарядных ионов — циклотрон У-300 (Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований).

Если камерой *Б* зарегистрировано вдвое меньше импульсов, чем камерой *А*, то число ядер нового элемента, пронесенных лентой мимо камеры *Б*, также вдвое меньше. Значит, за время t_0 половина ядер разделилась (t_0 — это время, равное периоду полураспада нового элемента). Расстояние l и скорость v мы выбираем сами. Зная значения этих величин и показания счетчиков, физики вычисляют период полураспада нового элемента.

В первых же опытах возникли непредвиденные трудности. Появились новые необычные спонтанно делящиеся ядра с периодом полураспада, близким к ожидаемому у новых элементов. Их назвали *спонтанно делящимися изомерами*. Был открыт новый процесс деления ядер, совершенно не предвиденный теорией. Осколки спонтанно делящихся изомеров маскировали распад и затрудняли поиски элементов. Для этого был создан новый метод регистрации осколков. Пришлось вдоль ленты установить на большой длине несколько детекторов. Теперь в одном опыте подсчитывались осколки деления в широком интервале времени жизни ядер.

Детекторы осколков, не чувствительные к другим частицам,— обычные стекла. Если к стеклянной пластинке поднести платиновую фольгу с нанесенным на нее спонтанно делящимся веществом, то осколок на поверхности стекла оставит след. Размер следа осколка равен длине цепочки из нескольких десятков атомов. Такие маленькие следы невозможно рассмотреть даже в самый сильный оптический микроскоп. Их можно увидеть в электронный микроскоп, но в этом случае потребовались бы годы на подсчет следов-треков. Помогла химия. Стекло растворяется в плавиковой кислоте. Если стеклянную пластинку, обстрелянную осколками, поместить в раствор плавиковой кислоты, то в местах, куда попали осколки, стекло будет растворяться быстрее и там образуются лунки. Их размеры в сотни раз больше первоначального следа, оставленного осколком. Лунки можно наблюдать в микроскоп со слабым увеличением. Другие радиоактивные излучения наносят поверхности стекла меньшие повреждения и не просматриваются после травления.

В 1964 г. начались опыты по синтезу 104-го элемента уже на основе новой методики: 104-й искали в «щелях» времени между спонтанно делящимися изомерами.

Идет опыт. Сорок часов беспрерывно бомбардируют ядра неона плутониевую мишень. Сорок часов лента несет синтетические ядра к стеклянным пластинкам. Наконец циклотрон выключен. Стеклянные пластинки переданы на обработку в лабораторию. С нетерпением ждем результата. Проходит несколько часов. Под микроскопом обнаружено шесть треков. По их положению вычислили период полураспада. Он оказался в интервале времени от 0,1 до 0,5 с.

Опыт повторили. Эффект исчез. Новый многочасовой опыт. Обнаружено пять треков, оставленных осколками новых ядер. Еще опыты. Треки в нужной

На этом гигантском ускорителе — самом мощном синхроциклотроне в мире (1972), у которого только одни магниты весят более 6 тыс. т, советские исследователи ведут очень важные исследования по выяснению загадочных свойств атомного ядра. На этом приборе было впервые проведено опытное изучение природы ядерных сил и синтезировано удивительное ядро гелия-8 с огромным избытком нейтронов. На синхроциклотроне ведется большая работа по созданию атомов, в которых вместо электронов на орбитах вращаются тяжелые частицы — мезоны с массой в 207 раз большей. Рождается новая, очень важная отрасль химии — мезохимия. В земных условиях на этом ускорителе можно создавать потоки космических лучей. На нем была отработана и испытана защита космических кораблей и обеспечена безопасность космонавтов при полетах в космосе.

области то появлялись, то исчезали. Такое явление никогда не наблюдалось при изучении спонтанно делящихся изомеров. Мы установили, что если мишень бомбардировать 5 ч ядрами неона со скоростью 31 500 км/с, то образуются два новых ядра; если же скорость неона увеличится до 32 000 км/с, то за такое же время образуется лишь одно ядро 104-го. Такая связь выхода новых ядер со скоростью бомбардирующих частиц могла быть только в том случае, когда образовывались ядра 104-го элемента. У изученных раньше спонтанно делящихся изомеров выход с увеличением скорости частиц-снарядов возрастал. Было поставлено еще несколько дополнительных опытов. Все они подтвердили — новый элемент открыт!

Шли годы, и в 1969 г. вместо плутониевой мишени физики Дубны поставили америциевую. Начался штурм 105-го элемента. Изотопы этого элемента образуются с еще меньшей вероятностью, чем атомы 104-го. Поэтому пришлось увеличить интенсивность пучка неона. На это и ушло время. Самый далекий элемент образовывался в ядерной реакции:

$$^{243}\mathrm{Am} + {}^{22}\mathrm{Ne} \longrightarrow {}^{261}105 + 4\,{}^{1}_{0}n.$$

Время жизни новых ядер оказалось равным примерно 2,8 с (период полураспада $\approx$ 2с).

После синтеза 104-го и 105-го элементов надо было изучить их химические свойства. Нужно было получить подтверждение, что электронная оболочка нового элемента застраивается так, как следует из таблицы Менделеева, и 104-й уже не относится к актиноидному ряду. На рисунке 2 показана схема исследования химических свойств 104-го элемента. Атомы отдачи выходят из мишени в струю азота, тормозятся в ней, а затем хлорируются. Соединения 104-го элемента с хлором легко проникают через специальный фильтр, а все актиноиды не проходят. Если 104-й принадлежал бы к актиноидному ряду, то и он бы задержался фильтром. Однако исследования показали, что 104-й элемент — это химический аналог гафния. Это важнейший шаг в заполнении таблицы Менделеева новыми элементами.

По предложению авторов открытия 104-го элемента его назвали курчатовий, в честь выдающегося советского физика Игоря Васильевича Курчатова. Курчатовий обозначают символом Ku.

Затем в Дубне были изучены химические свойства 105-го элемента. Оказалось, что его хлориды адсорбируются на поверхности трубки, по которой они движутся от мишени при температуре более низкой, чем хлориды гафния, но более высокой, чем хлориды ниобия. Так могли бы вести себя только атомы элемента, близкого по химическим свойствам к танталу. Посмотрите на таблицу Менделеева: химический аналог тантала — элемент № 105! Поэтому опыты по адсорбции на поверхности атомов 105-го элемента подтвердили, что его свойства совпадают с предсказываемыми на основе периодической системы.

Несколько позднее был изучен и α-распад нового элемента. Один из его изотопов — ядро $^{260}105$ испускает α-частицы с энергией 9,06 МэВ, а при распаде другого изотопа — $^{261}105$ рождаются α-частицы с энергией 8,93 МэВ.

Работа по изучению основных свойств элемента № 105 завершена в 1970 г. Ученые еще долгое время будут детально исследовать поведение «экатантала». Но не будут забыты 106-й и 107-й элементы. Быть может, когда вы будете читать эту статью, первые атомы элемента № 106 оставят следы своего распада в ядерных детекторах лаборатории в Дубне.

Превращения вещества

Пять из ста пяти

Удивительные элементы

Нам бы очень хотелось рассказать о всех химических элементах: о тех, которые существуют на Земле, и о тех, которые получены искусственно. Мы совершили бы удивительное путешествие по удивительной стране — периодической системе элементов, шаг за шагом, клетка за клеткой... От первой до сто пятой.

Но чтобы привести этот план в исполнение, понадобилась бы внушительного объема книжка, во всяком случае никак не тоньше 3-го тома Детской энциклопедии.

Может быть, целесообразно пойти по другому пути: попытаться предельно коротко рассказать о самых важных чертах каждого из ста пяти химических элементов; отыскать в каждом элементе свою «изюминку».

Давайте попытаемся...

Вот водород — первый в менделеевской таблице. Самый легкий газ. Самый распространенный элемент во Вселенной. Важнейшее термоядерное топливо звезд. Один из главных «ключей» ко многим законам химии.

А гелий с его необычной историей? Элемент, который сначала был обнаружен на Солнце и лишь спустя 27 лет найден на Земле. Инертный газ, он до сих пор не вступил ни в одно из химических соединений. Жидкий гелий не перестает поражать физиков. Его удивительное свойство сверхтекучести заставило пересмотреть многие классические представления физики.

Литий... Хотя его название происходит от греческого слова, означающего камень, он значительно легче воды. Другого подобного металла нет на Земле.

Бериллий. Что это — металл или неметалл? Он входит и в состав оснований, и в состав кислот.

За ним следует бор. Его соединения применяются чрезвычайно широко: это и всем известная борная кислота, но это и эффективное топливо для ракет.

Сказать коротко об углероде — невозможно. Углерод — это вся органическая химия, около 3 млн. химических соединений. Углерод — это жизнь на Земле, а быть может, и на других планетах во Вселенной.

Право же, избранный нами путь неудачен.

Разве заслуживает скороговорки железо? Элемент, который, образно говоря, сделал человека человеком. Когда люди научились выплавлять железо из руд и делать из него простейшие орудия, тогда и началась история современной «цивилизации».

Разве сухая протокольная сводка опишет поистине детективную историю редкоземельных элементов, которые ныне именуются лантаноидами? Долгое вре-

Так во всем мире принято обозначать важнейшие элементы.

мя их считали редкими, экзотическими, ненужными для человеческой практики. А оказалось: они вовсе не редкие, без них не взлетит современный самолет, не заработает ядерный реактор.

Разве можно рассказать в нескольких словах об уране? Этот элемент, пожалуй больше чем какой-либо другой, помог людям проникнуть в тайны материи.

Открытие явления радиоактивности и овладение ядерной энергией — все это самым непосредственным образом связано с ураном.

Поэтому мы решили посвятить небольшие очерки пяти химическим элементам периодической системы Д. И. Менделеева и рассказать о них так, чтобы юный читатель сумел получить достаточно полное впечатление.

Но каким именно пяти?

Математика поможет нам. Исходная предпосылка такая: дано 105 элементов. Сколько можно составить из этого количества комбинаций, содержащих по 5 элементов каждая?

Выбрать пять элементов из ста пяти можно способами, число которых равно: 96 560 646, т. е. почти 100 млн. способов! А нам из этих 100 млн. нужно выбрать один-единственный. Составить одну комбинацию из 5 химических элементов.

Можно смешать 105 карточек с написанными на них числами и наугад вытащить пять. Однако подобная затея рискованна: ведь может случиться так, что «счастливыми» окажутся порядковые номера одних, например, галогенов. Это очень интересная группа элементов. Но описывать только их было бы несправедливо по отношению к другим представителям периодической системы.

Необходим какой-то критерий отбора. Из статьи «Великий закон» вы знаете, что все известные в настоящее время элементы с точки зрения строения их атомов разделяются на четыре большие совокупности: *s*-, *p*-, *d*- и *f*-элементы. В их атомах заполняются электронные подоболочки, отвечающие определенным значениям орбитального квантового числа *l*, равного соответственно 0, 1, 2, 3.

Это обстоятельство существенно облегчает нашу задачу.

А дальше мы позволим себе быть немного субъективными. Те элементы, которые мы включили в пятерку «избранных», кажутся нам заслуживающими пристального внимания. И не потому, что они самые интересные: ведь в периодической системе нет неинтересных элементов. Они очень своеобразны, каждый по-своему. Вот их порядковые номера: 9, 14, 22, 87, 94. Вот их названия: фтор (F), кремний (Si), титан (Ti), франций (Fr), плутоний (Pu).

В чем же их своеобразие, если сказать о нем в нескольких словах?

Фтор — самый агрессивный, самый химически активный неметалл. Академик А. Е. Ферсман однажды очень метко назвал его всесъедающим.

Кремний — основа земной тверди, «скелет» огромного количества минералов и горных пород, дающий начало многим искусственным материалам с удивительными свойствами.

Титан — металл, который в самом прямом смысле оправдывает свое название; без него немыслима современная техника.

Франций — самый редкий на Земле элемент и самый химически активный из всех металлов.

Плутоний — искусственно полученный элемент, детище ядерной физики, основа ядерной энергетики.

С точки зрения строения атома франций является *s*-элементом, фтор и кремний — *p*-элементами, титан — *d*-элементом, плутоний — *f*-элементом.

А теперь поближе познакомьтесь с выбранными пятью элементами.

Загадка водорода

Не следует считать, что у водорода только одна загадка, и не следует думать, что у других элементов все известно, изучено и никаких загадок больше не осталось. Нет, загадочное в мире безгранично. Но вот перед учеными встала одна поистине замечательная загадка. Стоит хорошенько подумать, что может принести людям ее решение.

Пожалуй, наиболее знаком всем школьникам водород. И это справедливо — водорода в мире больше, чем всех остальных элементов, вместе взятых; водород изучен, пожалуй, лучше всех. Его свойства подробно описаны в учебниках: при температуре ниже —241°С его можно превратить в легкую, прозрачную, бесцветную жидкость, кипящую при — 252,8°С. При быстром испарении жидкий водород затвердевает, образуя кубические кристаллы. Твердый водород плавится при —259,2°С. Твердый водород образует молекулярную решетку и тока не проводит.

Но вот что рассчитали и предсказали теоретики. При достаточно высоком давлении водород должен превратиться в металл. Это, конечно, очень интересно, но еще не это самое поразительное. Оказы-

Фтор

В правом верхнем углу периодической системы Менделеева под номером 9 стоит элемент фтор — первый представитель группы галогенов. Этот элемент следовало бы выделить среди других особым цветом или яркой рамкой, потому что свойства его удивительны и не всегда понятны, химическое поведение своеобразно: он ни на что не похож, строптив, обладает необычайной реакционной способностью. Это самый активный элемент-неметалл из существующих в природе.

История фтора уходит в далекое прошлое и связана с драматическими ситуациями, сюрпризами и удивительными находками. Первое известное соединение фтора, о котором в XV в. упоминает Базилиус Валентинус,— фторид кальция, или плавиковый шпат. Ученый обнаружил способность минерала снижать температуру плавления руды и образовывать жидкие шлаки. Этот минерал назвали флюоритом и стали применять в металлургии как флюс.

В XVIII в. шведский химик К. Шееле установил, что серная и другие кислоты освобождают из плавикового шпата какую-то особую кислоту; в шпате она соединена с известью. Шееле назвал эту кислоту плавиковой, или кислотой флуория. Ученый не смог определить точно состав плавиковой кислоты, но доказал, что в ней содержится новый, очень активный элемент. Таким образом, честь открытия фтора принадлежит Шееле. Однако потребовалось еще около ста лет, чтобы получить фтор в свободном состоянии.

Ученые были убеждены в существовании фтора. В основе этих убеждений лежали аналоги соединений фтора с соединениями других галогенов: хлора, брома и иода. Но быть убежденным в существовании элемента и действительно выделить его в свободном состоянии — не одно и то же. Фтор как бы не хотел расставаться с металлами, связанными с ним в солях, и сопротивлялся любой попытке перевести его из мира загадок в мир известного.

Лаки, краски, ядохимикаты, лекарства и многое другое в виде растворов во фреоне упаковываются в аэрозольные контейнеры. При необходимости они извлекаются под собственным давлением в распыленном или пенообразном состоянии.

С помощью аэрозолей можно смывать грязь и масло с двигателей, красить машины, мебель.

Фтор не только хранил свою тайну, но и жестоко мстил тем, кто хотел в нее проникнуть. Первыми жертвами фтора были ирландские ученые братья Георг и Томас Нокс. Томас отравился фтористым водородом и умер, а Георгу пришлось долго лечиться. Бельгийский профессор П. Луйэ, самоотверженно продолжавший опыты братьев Нокс, вскоре тоже поплатился жизнью. Такая же участь постигла французского химика Д. Никле, изучавшего способы получения фтора.

вается, металлический водород должен обладать сверхпроводимостью. Но и это не самое удивительное. Расчет показал, что можно ожидать, что сверхпроводящие свойства металлического водорода должны сохраняться вплоть до комнатной температуры. А самое неожиданное и замечательное — теоретики совершенно серьезно обсуждают и надеются на возможность того, что водород, подвергнутый раз чудовищному давлению — не менее чем до 250 ГПа ($250 \cdot 10^9$ Па) — и превратившийся в сверхпроводящий металл, может остаться в таком состоянии и после снятия давления. Такое метастабильное состояние может оказаться достаточно устойчивым.

Астрофизики совершенно уверены, что металлический водород находится в недрах планет-гигантов: Юпитера и Сатурна.

Стоит помечтать о том, как преобразится жизнь на Земле, если сбудется мечта ученых об овладении металлическим, сверхпроводящим водородом. Хотя и очень трудно себе представить водородные электропровода и электродвигатели из водорода, но вспомните, сколько невозможных предсказаний науки оправдалось.

Однако ничто не могло остановить любопытство человека. Много времени и сил отдали химии фтора всемирно известные ученые А. Ампер, М. Фарадей, Э. Фреми, Ж. Гей-Люссак, Г. Дэви. И хотя их работы так и не привели к получению свободного элемента, о фторе и его соединениях становилось известно все больше и больше.

В 1863 г. получением фтора занялся известный французский химик Анри Муассан. Он воспользовался результатами своих предшественников, и особенно наблюдениями своего учителя Э. Фреми. В 1886 г. Муассану удалось получить свободный фтор электролизом фтористого водорода, т. е. способом, который безуспешно применяли его предшественники. Но чтобы еще раз проверить чистоту исходных продуктов, ученый подверг фтористый водород вторичной перегонке. Это стало причиной неудачи повторных опытов — чистая кислота не проводила электрический ток. Пузырьки газообразного фтора не появлялись. Лишь в последующих работах Муассану удалось показать, что только при добавлении нескольких кристалликов фторида калия фтористый водород становился проводником тока. Успех первых опытов и объяснялся присутствием примеси соли.

Теперь мы знаем: чтобы получить свободный фтор, необходимо отнять от иона фтора электрон, очень прочно связанный с атомом элемента. Характеризуя эту особенность, химики говорят, что фтор отличается исключительно высоким сродством к электрону. Поэтому задача освобождения фтора могла быть разрешена только при помощи электрического тока — универсального окислительно-восстановительного агента, которому можно придать любой «окислительный потенциал», изменяя электрическое напряжение.

Длительная и волнующая история поисков свободного фтора, полная неудач и трагических происшествий, закончилась победой химиков. Таинственный фтор, светло-желтый газ с резким раздражающим запахом, был получен. По запаху можно обнаружить в воздухе присутствие одной миллионной грамма фтора. При температуре минус 188° С он превращается в жидкость канареечно-желтого цвета. Только недавно ученые установили, что при температуре кипения плотность жидкого фтора более 1500 кг/м^3. Это оказалось очень важно для ракетной техники.

Когда фтор выделили из соединений с другими элементами, была обнаружена его поразительная реакционная способность. Оказалось, что этот газ реагирует почти со всеми известными элементами и соединениями: при комнатной температуре воспламеняет бумагу, древесину, уголь и асбест. *Он поджигает даже воду* и без особых усилий может воспламенять многие металлы, разрушает стекло, фарфор и большинство минералов.

Фтор — сильнейший окислитель, более сильный, чем кислород, поэтому он реагирует с большинством окислов, вытесняя из них кислород. В частности, это происходит и с водой. Реакция идет так энергично, что вода буквально горит:

$$2F_2 + 2H_2O \longrightarrow 4HF + O_2.$$

Нагретая вода горит в струе фтора бледно-фиолетовым пламенем. При этом образуется фтористый водород. В этой реакции в отличие от других реакций горения кислород является не причиной, а продуктом горения.

После первых успешных опытов по выделению фтора начались попытки укрощения и использования его необычайных свойств. Эта работа, полная интересных и значительных открытий, позволила ученым-химикам получить новые вещества с удивительными свойствами, которых не существовало в природе.

Оригинальность химического поведения фтора и удивительные результаты его взаимодействия с другими элементами и их соединениями вызваны рядом причин, в частности его высокой электроотрицательностью и очень большим потенциалом ионизации. Электроотрицательность фтора (в условных единицах) составляет 4; кислорода — 3,5; азота и хлора — 3; углерода — 2,5; лития — 1. Это значит, что атом фтора сильнее атомов всех других элементов притягивает электроны и труднее всего их отдает. Атомы фтора очень малы по размерам, поэтому они плотно располагаются вокруг атомов других элементов. В результате образуются соединения, богатые фтором.

Исследование соединений фтора до начала XX в. охватывало преимущественно область неорганических фторидов.

Первое фторорганическое соединение было синтезировано более ста лет назад выдающимся ученым-химиком и великим русским композитором А. П. Бородиным. Однако химия этих веществ начала развиваться только последние 30—40 лет. Особенно важны работы бельгийского химика Ф. Свартса, который всю свою жизнь посвятил исследованиям фтора. Сначала он разработал способы получения сравнительно простых органических соединений, в которых водород был частично заменен фтором. Известно, что галогенопроизводные получаются прямым воздействием на углеводороды хлора, брома и иода. Для фтора этот способ неприго-

Что это такое? (Отгадку найдете на одной из страниц этого тома ДЭ, если хорошенько поищете.)

ден: он обладает настолько высокой реакционной способностью, что при фторировании возникают быстрые цепные экзотермические реакции, в ходе которых молекулы фторируемого вещества разрушаются. Так, еще Муассан установил, что фтор реагирует с органическими соединениями и даже с углем чрезвычайно бурно. В результате реакций образуется уголь, фтористый водород и тетрафторметан (CF_4). Позднее ряду ученых удалось выделить при подобных реакциях тетрафторметан и небольшое количество других, полностью фторированных углеводородов. Это были, по-видимому, первые *фторуглероды* — соединения, состоящие только из фтора и углерода.

Свартс пошел иным путем. Он разработал метод косвенного фторирования, в котором использовал действие фторидов металлов, например фтористой ртути, серебра и особенно сурьмы, на другие галогенопроизводные углеводородов. При этом происходил обмен имеющегося в молекуле другого галоида на фтор. Свартсу удалось получить большое количество соединений, содержащих фтор: фторированные спирты и эфиры, трифторуксусную кислоту и некоторые фторуглероды. Эти исследования принесли Свартсу славу выдающегося химика. Но ни одно из синтезированных веществ не нашло практического применения. К ним относились как к любопытным курьезам химии, и только. Сейчас это кажется странным, но так было в действительности. Многие только догадывались об их своеобразных свойствах и не могли наметить пути их использования.

Постепенно, шаг за шагом, познавалась химическая сущность новых веществ: у некоторых фтор- и фторхлорэтанов были обнаружены интересные термодинамические свойства. Еще до второй мировой войны их пытались применить в холодильной технике в качестве хладоагентов.

В ходе второй мировой войны началась гонка за овладение новым, в том числе атомным, оружием. Вероятно, Свартс, который умер в Бельгии во время немецкой оккупации, не представлял себе, что фторуглероды вызовут огромный интерес у химиков, занятых в «Манхэттенском проекте» (кодовое название работ по созданию атомной бомбы в США). На крошечных образцах, хранившихся в Пенсильванском университете, удалось обнаружить стойкость фторуглеродов к очень агрессивному веществу — гексафториду урана. Как оказалось, этот фторуглерод (перфторгептан) смешивался с гексафторидом урана, но не вступал с ним во взаимодействие. Препарат прошел испытания и был немедленно засекречен. Он получил условное название «Вещество ДЖО» по имени химика Джорджа Саймонса.

Так была открыта необычайная химическая стойкость новорожденных фторуглеродов, которую стали использовать в атомной промышленности. Это послужило мощным толчком для развития химии фтора в целом. Ученые старались собрать все то немногое, что было известно о химии соединений фтора, чтобы получить новые и лучшие вещества. Результаты вскоре сказались.

Началось широкое применение фторуглеродов в технике. Но сначала расскажем еще об одном их применении во время второй мировой войны.

Английские и американские войска на тихоокеанском театре военных действий несли огромные потери, но не только в результате ожесточенных боев, а из-за массовых заболеваний от укусов комаров и москитов. Обычные способы борьбы с насекомыми были малоэффективны. Тогда легко кипящие фтор- и фторхлоруглероды применили как растворители для инсектицидов в аэрозольных баллонах. Таким способом удалось быстро и экономично распылять инсектициды и уничтожать носителей инфекций.

После этого открытия начала развиваться и промышленность аэрозолей. Лаки, краски, ядохимикаты, лекарства и многое другое упаковываются в аэрозольные контейнеры в виде раствора во фреоне (фторхлоруглероде). Оттуда при необходимости они под собственным давлением выходят в распыленном или пенообразном состоянии. С помощью упаковок под давлением можно смывать грязь и масло с двигателей, красить стены и мебель, наносить защитные слои на картины и чертежи и т. д.

Слово «фторуглероды» начало входить в химический лексикон примерно в 40-е годы XX в. Теперь его знают уже не только химики. Это слово относится к современной новой области химии и объединяет сотни тысяч новых веществ. За очень редким исключением, этих веществ нет в природе. Они созданы человеком.

Фторуглероды являются химическими братьями углеводородов. Строение фторуглеродов и углеводородов, в сущности, одно и то же. Единственная

На основе фторопласта-4 можно изготовить лыжную мазь или специальное покрытие для лыж, которое пригодно для любой температуры. Дело в том, что коэффициент трения фторопласта-4 фактически не зависит от температуры.

С помощью аэрозольных баллонов можно быстро и экономично распылять инсектициды для защиты растений от вредителей.

разница состоит в том, что в молекуле фторуглеродов все атомы водорода заменены на атомы фтора. На этом их сходство заканчивается. По реакционной способности, по отношению к температуре, по своей устойчивости и многим другим химическим и физическим свойствам оба ряда веществ ведут себя совершенно различно. Нам уже известно, что фтор чрезвычайно активно взаимодействует с другими элементами и веществами. При реакциях фторирования выделяется огромное количество тепла. Вступая в химическое взаимодействие, фтор растрачивает свою могучую энергию и образует очень стойкие соединения, характеризующиеся высокими значениями энергии связи фтора с углеродом. Чтобы разрушить такое соединение, надо затратить не меньшую энергию, чем та, которая выделилась при его образовании.

Это один из «секретов» фтора как источника энергии и одна из причин необыкновенной стойкости фторуглеродов. Другая причина их устойчивости в том, что атомы фтора, окружающие углеродный скелет, фактически теряют способность реагировать с кислородом или окислительными агентами. Атомы же углерода, соединившись с фтором, находятся в предельно окисленном, пассивном состоянии. Панцирь из атомов фтора не только защищает углеродный скелет, но и делает молекулы фторуглеродов практически не способными к взаимодействию с другими молекулами того же типа. Этим объясняется низкая температура кипения фторуглеродов при их высокой молекулярной массе, низкое поверхностное натяжение и слабая адгезия, т. е. слабая способность к прилипанию.

Фторуглероды оказались превосходными изоляторами. Выдерживая высокое электрическое напряжение, они не подвергаются разложению и предотвращают диэлектрические потери. Наряду с термической и химической стабильностью они обладают еще отличными термодинамическими свойствами. Сочетание стольких качеств в веществах, которые к тому же безвредны, быстро определило их использование в современной технике.

С каждым годом у них открываются все новые и новые «профессии». Без фторуглеродов уже немыслимы современные холодильники и кондиционеры воздуха. Их используют, например, в качестве веществ, снимающих тепло, при создании миниатюрных аппаратов большой мощности, что особенно важно в электронной и авиационной технике. С помощью фторуглеродных жидкостей охлаждают трансформаторы, радарные лампы высокой мощности и другие электронные устройства.

Современные самолеты, автомобили, ракеты и самые разнообразные механизмы нуждаются в смазочных материалах, гидравлических жидкостях. Если эти материалы делать из нефтепродуктов, то они легко воспламеняются и разрушаются при высокой температуре. У высококипящих фторуглеродов подобных недостатков нет. В различных конструкциях они служат как смазки и гидравлические жидкости настолько долго, что их называют вечными маслами. Благодаря высокому содержанию фтора эти масла стойки ко всем видам окисления, будь то горение на воздухе или химическое воздействие окислителей. С помощью фторуглеродных масел можно будет создать двигатели нового типа, работающие при более высоких температурах и в более жестких условиях.

Исследуя фторированные олефины (аналоги и гомологи этилена), ученые получили фторированные

полимеры, каучукоподобные и многие другие вещества — спирты, кислоты, сульфиды, амиды. Первые полимеры были получены из тетрафторэтилена и трифторхлорэтилена.

Не обошлось здесь и без сюрпризов. Полимер тетрафторэтилена был открыт случайно. Химик Планкет исследовал реакции фторолефинов. Из баллона прекратилась подача тетрафторэтилена, хотя в баллоне должно было быть еще много газа. Когда баллон вскрыли, обнаружилось, что он заполнен белым порошком, напоминающим асбест. Это и был первый полимер тетрафторэтилена, который позднее назвали органическим благородным металлом. Случайные обстоятельства оказались ключом к большому открытию. Теперь политетрафторэтилен, или фторопласт-4, — важнейший из фторполимеров и пластиков вообще. Он отличается удивительной химической инертностью — не изменяется в горячих крепких кислотах и щелочах и даже в «царской водке», растворяющей золото. Фторопласты по стойкости к агрессивным средам превосходят благородные металлы. Благодаря своим диэлектрическим свойствам фторопласт-4 и другие фторполимеры стали незаменимыми материалами в электротехнической и радиоэлектронной промышленности. Фторопласт-4 химически инертен, безвреден для живых организмов. Поэтому его успешно применяют в разных областях восстановительной хирургии. Из фторопласта-4 делают протезы суставов, кровеносных сосудов и даже клапанов сердца. Кроме твердых пластиков из фторуглеродов теперь получают эластичные материалы, которые обладают свойствами каучука. Эти фторкаучуки не набухают в бензине и керосине, выдерживают воздействие крепких серной и азотной кислот. Обыкновенная резина в таких условиях разрушается чрезвычайно быстро.

Свойство фторуглеродов снижать поверхностное натяжение используется для синтеза новых поверхностноактивных веществ (ФПАВ), сохраняющих свои свойства в сильных кислотах и щелочах. Обычные углеводородные поверхностноактивные вещества (ПАВ) при этом разрушаются. Бумага, текстильные ткани, кожа, обработанные ФПАВ, становятся водо- и маслоотталкивающими. Соединения фтора применяют также при синтезе прочных светоустойчивых красителей, отличающихся особой яркостью и глубиной цвета.

Физико-химические особенности фтора дают возможность создавать не только стабильные, но и очень реакционноспособные соединения с биологической активностью. Уже синтезировано большое количество лекарств, например препараты для лечения болезней щитовидной железы, заменители хинина и противовоспалительные средства (мази — синалар, оксикорт и др.).

В некоторых растениях были найдены ядовитые фторсодержащие вещества — фторацетаты. В Южной Африке растет ядовитое растение гифтблар. Его сок — сильнейший яд. Интересно, что растение встречается в местах с повышенным содержанием фтора в почве и воде. Это один из очень редких примеров существования природных органических соединений фтора.

Вместе с бурным развитием химии фторорганических соединений в 60-е годы начала вновь развиваться неорганическая химия фтора. В 1963 г. удалось показать, что фтор способен взаимодействовать с инертными газами — ксеноном и криптоном (XeF_6, KrF_4); до этого инертные газы называли химической пустыней, так как они не вступали в какие-либо реакции.

В поисках новых источников энергии для движения ракет еще К. Э. Циолковский обратил внимание на фтор. Современные исследования подтвердили, что фтор как окислитель ракетного топлива эффективнее кислорода. Вместе с высокой реакционной способностью в этом случае важна высокая плотность жидкого фтора. Применение фтора в ракетной технике весьма перспективно.

Химия фтора является поставщиком уникальных химических и термически стойких материалов, пластиков, эластомеров, фреонов, вечных масел, без которых немыслимо решать важнейшие вопросы авиационной, космической, электронной и даже медицинской техники.

В то же время химия фтора богата чрезвычайно активными и энергоемкими соединениями, к числу которых относятся фториды галогенов, кислорода, азота и сам фтор. Многие из них также могут служить источником энергии в ракетной технике.

Соединения фтора, обладающие физиологической активностью, обещают привести к интересным результатам, особенно в создании новых лекарственных веществ.

Новые проблемы, выдвигаемые современной наукой и техникой, могут успешнее разрешаться, если заниматься тщательным исследованием малоизученных элементов и создавать на их основе новые структуры. Открытие новых соединений фтора — крупнейшее достижение современной химии

Кремний

В четвертой группе периодической системы элементов Менделеева рядом с углеродом под № 14 находится элемент кремний. Он ничем не выделяется среди своих соседей — ни атомной массой, ни конфигурацией внешних электронных оболочек. Между тем это элемент необыкновенный. Начать хотя бы с того, что кремний — один из наиболее распространенных элементов в природе. В земной коре содержится 27,6% кремния. Только кислорода на нашей планете больше.

В свободном виде кремний в природе не встречается. Он входит в состав различных пород, которые попадаются нам на каждом шагу,— кварца, кварцита, песчаника, глины, многих других горных пород и минералов. В живой природе кремний как микроэлемент входит в состав панциря крошечных существ — кремниевых губок, радиолярий. Их скелет образует самое распространенное соединение кремния с кислородом — двуокись кремния SiO_2.

Соединения кремния являются непременной частью растительных и животных организмов, где они необходимы для образования твердых скелетных частей и тканей. Некоторые наземные растения, например злаки, также могут концентрировать кремний. Животные получают кремний с пищей. В наибольших количествах кремний обнаружен в плотной соединительной ткани, в почках, в поджелудочной железе. Кожа обязана кремнию своей упругостью, волосы — блеском, зубы — твердостью, а кости — крепостью.

Еще в глубокой древности человек использовал вещества, содержащие кремний. Более 5 тыс. лет назад было изобретено стекло, представляющее собой сложное соединение кремнезема с другими окислами. Тогда стекло было очень хрупким материалом, и многие умельцы стремились придать ему прочность.

В течение многих веков люди улучшали прочность стекла, старались сделать этот ценный материал красивым, придать ему лучшие формы. В XIII в. Марко Поло привез из Китая белые полупрозрачные, очень красивые чаши и вазы. Они были изготовлены из широко распространенного в природе алюмосиликата — каолина. В 1449 г. английский мастер Джон из Ютанама получил первый патент на способ изготовления цветного стекла.

И только в XX в. ученые и инженеры изучили состав и структуру стекла и смогли целенаправленно влиять на его свойства, особенно механические. Теперь стекло используют не только для остекления зданий, но и как строительный материал, как высокопрочный материал для иллюминаторов батискафов и космических кораблей, как основу красивейших синтетических тканей. Из стекла в сочетании с кирпичом и бетоном сооружают здания с коэффициентом светопропускания 0,68—0,8. Количество производимого в мире стекла превышает 20 млн. т в год — больше, чем производство любого металла, за исключением стали и чугуна.

Начало истории кремния считают с момента получения его в свободном виде. Это сделали в 1811 г. французские химики Ж. Л. Гей-Люссак и Л. Ж. Тенар, пропуская пары фтористого кремния над металлическим калием. Однако не они описали кремний как элемент. Впервые это сделал шведский химик И. Я. Берцелиус в 1823 г. Новому элементу было дано название «силиций» (от латинского слова, обозначающего «кремень»). Русское название «кремний» введено в 1834 г.

Кремний существует в двух аллотропических видоизменениях — аморфном и кристаллическом. Аморфный кремний получают восстановлением кремния из его соединений металлами, кристаллический — сплавлением кремнефтористого калия с алюминием или металлического магния с двуокисью кремния.

При нормальной температуре кремний очень твердое вещество, температура плавления 1480—1500° С. Плотность аморфного кремния 2,35 г/см^3, кристаллического 2,42 г/см^3. По электрическим свойствам кремний относится к полупроводникам, и его удельное электрическое сопротивление резко уменьшается при повышении температуры, что обусловлено изменением проводимости поверхностных слоев. Удельное электрическое сопротивление кремния очень сильно зависит от примесей. Оно равно 10 Ом · см для технического кремния и выше 30 Ом · см — для чистого кремния. Благодаря специфическим электрическим свойствам кремний широко применяют в радиоэлектронике и радиотехнике. Полупроводниковые свойства кремния позволили создать малогабаритную радиоаппаратуру.

Важное значение приобрел кремний в производстве различных сплавов с металлами. Его склонность образовывать при сплавлении с многими металлами химические соединения — силициды — дала возможность получать в огромных количествах такие незаменимые в машиностроении сплавы, как силумин и др.

Кремний занимает в неорганической природе такое же положение, как и углерод в живой природе, органической химии и химической технологии. И все исследования соединений кремния, начиная с 1825 г., когда был синтезирован $SiCl_4$, до середины XIX в., охватывали область неорганических соединений. Сюда относятся соединения кремния с водо-

родом — силаны, силикаты натрия Na_2SiO_3 (жидкое стекло) и др.

В 1845 г. были получены первые кремнийорганические соединения. Но минуло почти сто лет, пока химия таких соединений получила широкое развитие. Практическое же их применение теперь почти безгранично. Следует отдать дань уважения ученым, которые предоставили такую возможность человечеству. Английский химик Ф. С. Киппинг посвятил всю жизнь изучению кремнийорганических соединений. Ему удалось синтезировать много таких соединений и значительно усовершенствовать методы исследований. Однако ни одно из соединений, описанных в то время учеными, не нашло практического применения, и Киппинг сказал, что он не видит «перспектив для практического использования кремнийорганических соединений». Сейчас это кажется удивительным. Главное внимание было сосредоточено на сравнении свойств кремния и углерода. Ученые установили основное их отличие. Оно заключается в том, что углерод способен одинаково легко соединяться и с электроотрицательными и с электроположительными элементами, кремний же обладает большей склонностью к соединению с электроотрицательными элементами и группами. Но тогда не учитывалось, что кремний можно использовать для построения больших молекул. А между тем кремний в соединении с кислородом встречается в природе преимущественно в виде полимерных веществ.

В исследованиях советских ученых (конец 30-х годов) появилось новое направление в химии кремнийорганических соединений — изучение процессов образования макромолекулярных соединений. Был осуществлен синтез макромолекул, цепи которых построены из атомов кремния и кислорода, а органические группы участвуют только в обрамлении неорганической цепи молекулы. Так было положено начало развитию высокомолекулярной химии кремнийорганических соединений. Эти вещества, неизвестные в природе, от начала до конца синтезированы и исследованы в лабораториях. Открытие и разработка методов получения кремнийорганических высокомолекулярных соединений и их применение в технике были сделаны спустя 75 лет после первого синтеза простейших кремнийорганических соединений.

Высокомолекулярные кремнийорганические соединения широко изучаются в институтах и заводских лабораториях. Получены полимеры, цепи молекул которых не только построены из атомов кремния и кислорода, но включают в себя бор, алюминий, титан, фосфор, кобальт, никель и др.

Таким образом, кремнийорганические полимеры содержат в своем составе многие элементы, и их необычные свойства являются результатом сочетания высокой теплостойкости кварца и эластичности, свойственной органическим полимерам. Так, полиорганосилоксаны обладают очень высокой устойчивостью против действия влаги, холода, тепла, они химически инертны, стойки против окисления, способны противостоять продолжительному действию солнечного света и озона. Жизнь кремнийорганических полимеров благодаря сочетанию указанных свойств по крайней мере в десять раз продолжительнее, чем соответствующих органических полимеров. Они не содержат химически активных групп, которые могли бы вредно действовать на металлы. Эти свойства характерны для всех типов полиорганосилоксанов.

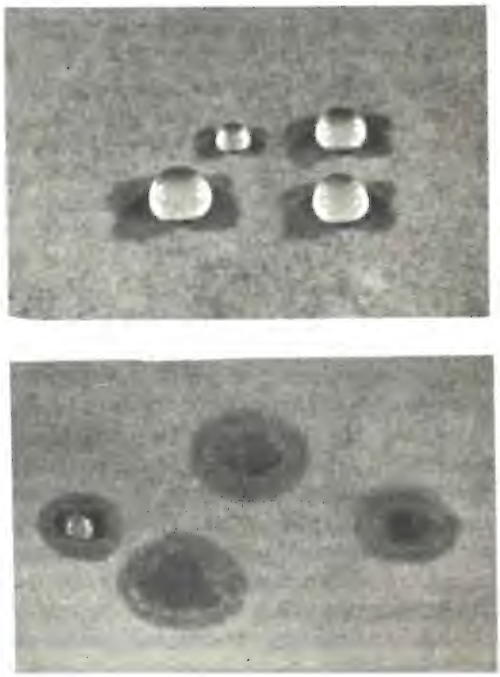
Диэлектрические свойства их также являются необыкновенными. При одинаковой толщине материала многие кремнийорганические полимеры выдерживают более высокую напряженность поля в широких интервалах температуры и влажности, чем органические материалы. Электрическое сопротивление, диэлектрические потери и другие важные для электротехнического применения показатели исключительно высоки при широком колебании внешних условий и при высоких температурах.

Комплекс таких свойств полиорганосилоксанов обеспечил их широкое практическое применение. Изготовленная из таких материалов теплостойкая изоляция для электрических машин, трансформаторов, проводов и кабелей позволяет значительно продлить срок их службы, уменьшить габариты машин. Термостойкие кремнийорганические полимеры помогли решить целый ряд специфических задач, связанных с работой электрического оборудования в особо сложных условиях — на угольных шахтах, металлургических заводах, в условиях тропического климата, повышенной влажности, при вибрационных нагрузках и т. д. Электродвигатели врубовых машин и угольных комбайнов, при изготовлении которых используются кремнийорганические материалы, служат в шесть раз дольше, чем обычные. Ремонт таких двигателей обходится в несколько раз дешевле.

Одним из важнейших свойств полиорганосилоксанов является их устойчивость против воздействий тепла и холода. Слоистые материалы на их основе могут продолжительное время работать при температуре 200° С. Около 10 000 ч они могут противостоять действию температуры 420° С. Пример исключительной эластичности кремнийорганических полимеров с линейными цепями молекул — резина из

В современных строительных материалах широко используют кремнийорганические полимеры для герметизации швов сборнопанельных зданий и гидрофобизации стен.

Капли воды на бумаге, обработанной кремнийорганическим жидким полимером *(вверху)* и не обработанной *(внизу)*.



полиорганосилоксана, устойчивая при температуре 300° С и сохраняющая высокую эластичность при температуре — 90° С. Техника давно нуждается в таких замечательных материалах.

Жидкие кремнийорганические полимеры широко используют для создания теплостойких и морозостойких смазок и масел, работающих при температуре 200° С, диэлектриков, герметиков, гидравлических и демпферных жидкостей, а также для гидрофобизации (придания водоотталкивающих свойств) самых различных материалов. Так, например, обработка бумажного или шерстяного волокна кремнийорганическими жидкостями не только придает ему способность не смачиваться водой, но и улучшает другие свойства ткани — умягчает ее, повышает устойчивость к истиранию, уменьшает блеск при носке. Изделия из такой ткани можно до десяти раз отдавать в химчистку — они не изменят приобретенных свойств. Обработанное кремнийорганическими жидкостями сукно выдерживает интенсивное дождевание в течение 18 ч подряд! Плащ или шинель, сделанные из этого сукна, не промокнут в любой дождь, хотя воздухопроницаемость их, что крайне важно для здоровья человека, ничуть не меньше, чем у обычного сукна. Подобным же образом ведет себя обработанная кремнийорганическими жидкостями кожа.

Кремнийорганическими жидкостями обрабатывают тесторазделочные линии и рабочие детали тестоформующих машин. Поэтому к ним не прилипает тесто, отпадает надобность в подсыпке муки и смазке форм при хлебопечении пищевыми жирами. Это, казалось бы, мелочь, но получается огромная экономия масла, муки, и, что очень важно, людям, выпекающим хлеб, становится работать гораздо легче, а производительность труда намного повышается. Одна обработка кремнийорганической жидкостью форм для хлебопечения позволяет повторять выпечку 2000 раз.

Кремнийорганические жидкости находят применение в литейном деле. С их помощью можно без труда отделять отливки от песчаных форм. Используют их и для предупреждения примерзания замороженной пищи к полкам холодильников, и как антивспениватели в производстве сахара, вин, синтетического каучука, и как вещества, способные создавать высокий вакуум в вакуумных насосах.

«Ненависть» некоторых типов кремнийорганических жидкостей (силиконов) к воде используется для придания гидрофобности не только тканям и кожаной обуви, но и стеклу, керамике, бумаге, картону.

Необычное свойство кремнийорганических жидкостей — малая зависимость вязкости от температуры — нашло применение в вибрационных демпферах. И уж совсем неоценимый эффект дают кремнийорганические полимеры в качестве теплостойких и атмосферостойких покрытий для защиты от кор-

Капли воды на ткани, обработанной жидким полимером *(вверху)* и не обработанной *(внизу)*.

Скафандр защищает космонавта от теплового воздействия солнечных лучей и от переохлаждения в космическом пространстве. При изготовлении таких материалов широко используются силиконовые материалы.

розии стали, алюминия и других металлов. Эти покрытия используются для окраски электрических печей, электрических нагревателей, дымовых труб, камер сгорания авиационных, автомобильных, судовых, тепловозных двигателей, промышленных печей, отопительных приборов,— словом, всех тех устройств, где высокая температура и влажность раньше разрушали тысячи тонн полезных материалов.

Полиорганосилоксановые покрытия, в состав которых входят различные пигменты (алюминий, цинк, окись титана, хромат и др.), не только образуют защитные пленки, длительно работающие при 500° С, но и являются красивейшими отделочными материалами в строительстве. Покрытия, обработанные кремнийорганическими полимерами, защищают здания от сырости — вода во время дождя скатывается со стен. Это особенно важно в условиях нашего климата.

Хотя кремний и принадлежит к числу наиболее изученных элементов периодической системы, он еще таит в себе много загадок.

Титан

Титан — один из наиболее распространенных элементов в природе. В земной коре масса титана составляет 0,61% массы Земли. В одном музее исследовали имеющиеся в коллекции минералы и обнаружили, что из 1000 различных минералов около 800 содержат титан. Однако полтора века назад об истинных свойствах этого элемента почти ничего не знали.

Открытие титана было необычно: оно состоялось трижды. В 1789—1791 гг. английский химик У. Грегор, исследуя состав магнитного железистого песка из района Менакен в Корнуэле (Южная Англия), выделил новую «землю» (окись) неизвестного металла, которую назвал менакеновой.

В 1795 г. немецкий химик М. Клапрот открыл в минерале рутиле новый элемент и назвал его титаном. Спустя два года Клапрот установил, что рутил и менакеновая земля — окислы одного и того же элемента, за которым и осталось название «титан».

Через 10 лет открытие титана состоялось в третий раз. Французский ученый Л. Воклен обнаружил титан в анатазе и доказал, что рутил и ана-

таз — идентичные окислы титана. Интересно отметить, что еще в 1799 г. появилась статья русского ученого Товия Ловица, который вел наблюдения над титаново-магнетитовыми рудами Урала,— «Показание некоторых замечаний о титане». В ней рассказывалось о свойствах титана. Естественно, что и в этой работе и в дальнейших исследованиях речь шла о титане, загрязненном различными примесями.

Слабое развитие аналитических способов определения титана нередко приводило к грубым ошибкам: например, до 1848 г. за титан принимали кристаллы из шлаков доменных печей, пока немецкий химик Ф. Вёлер не доказал, что эти кристаллы — карбонитрид титана.

До 1870 г. даже атомная масса титана была определена неправильно, и только великий русский химик Д. И. Менделеев на основании положения титана в периодической системе элементов предсказал его действительную атомную массу (48 вместо 52).

Сравнительно чистый металлический титан был получен лишь в 1910 г. американским химиком Хантером. Но и этот металл содержал еще ряд примесей, резко искажавших его подлинные физические и химические свойства.

В первой четверти нашего века во всех справочниках и учебниках по химии и металлургии титан характеризовался как очень хрупкий металл, с трудом поддающийся механической обработке. Лишь в 1925 г. голландские ученые А.-Ван Аркель и де Бур, применив разработанный ими метод термической диссоциации иодидов металлов, получили титан очень высокой чистоты. На первых образцах этого металла были определены истинные физические свойства титана. Металл оказался удивительно пластичным, прочным, легким, жаростойким. Эти ценные свойства давали возможность предположить, что настанет время и титан будет широко применяться в технике. Но даже в 40-х годах XX в., когда уже научились получать титан в значительных количествах, широкого использования он не находил. Это был металл будущего.

Росла скорость самолетов. Перед авиацией встала проблема звукового и теплового барьеров. Все выше перемещался и «потолок» полетов. Потребовался материал легкий и прочный. Алюминий, алюминиевые и магнитные сплавы, которые использовались в самолетостроении, новым требованиям не удовлетворяли. Для реактивного двигателя требовался жаропрочный и легкий материал. Этим требованиям отвечал титан. Его высокая точка плавления (1725° С) сочетается с низкой плотностью и большой прочностью, в шесть раз превышающей прочность стали. Внешне же титан похож на сталь. Благодаря сочетанию легкости с механической прочностью и трудной окисляемостью титан и его соединения стали ценнейшими строительными материалами в новой технике. Из него делают лопасти газовых турбин реактивных двигателей, фюзеляжей и кабины высотных самолетов, перегородки, трубы и части различной аппаратуры. Так, в одном из американских сверхзвуковых самолетов из титановых сплавов сделано более 20 тыс. различных деталей. Замена титановыми сплавами стальных деталей двигателей снижает удельную массу самолетов на 30—40%.

В ракетостроении титан используют для изготовления корпусов двигателей ракет, емкостей для жидкого водорода и другой аппаратуры.

Неоценимым материалом оказался титан и в судостроении. В титановой пластинке, погруженной в морскую воду, через 10 лет не было обнаружено никаких изменений, а ведь от стальной пластины остались бы одни воспоминания. Обшивка кораблей титановыми пластинами не требует никакой антикоррозийной защиты. Титановыми листами покрыт монумент в честь покорителей космоса в Москве.

Титановые сплавы применяют при изготовлении навигационных приборов, насосов и трубопроводов, а также для обшивки судов и подводных лодок. В обычной воде титан подвергается коррозии лишь при 800° С. Да что вода, даже концентрированная серная кислота против титана бессильна. Способность титана жадно поглощать газы и давать прочные соединения с азотом и углеродом (это обстоятельство, кстати, затрудняет получение титана в чистом виде) также стали использовать в технике — для удаления газов из расплавленных металлов там, где вакуум-насосы не могут поймать и удалить остатки газов. Чистый титан в виде проволоки, ленты и других изделий используют в электровакуумной технике для изготовления анодов, сеток, антикатодов рентгеновских трубок и других деталей.

Титан и его сплавы обладают повышенной коррозионной стойкостью против ряда химических реагентов — влажного хлора, азотной кислоты, органических кислот и др. Поэтому титан широко применяют в химическом машиностроении. В производстве хлора из титановых сплавов изготовляют трубопроводы, теплообменники, насосы для перекачки хлорных и солевых растворов. Стойкость этой аппаратуры в 10—20 раз выше, чем аналогичных насосов из нержавеющей стали. В производстве азотной кислоты применяют титановую аппаратуру для хранения и перевозки 60—70-процентной HNO_3; в дымящей кислоте титан взрывоопасен.

Аппаратурой из титана пользуются при получении уксусной, муравьиной и других кислот, в производстве мочевины и органических красителей. С добавлением титана сталь становится тверже и эластичнее. Из такой стали изготовляют рельсы, вагонные оси, колеса.

Титан и его сплавы широко применяют в черной и цветной металлургии. Ферротитан — сплав железа с титаном — служит для раскисления и деазотизации стали. Титан связывает не только кислород и азот, но и серу. Титан добавляют в сплавы цветных металлов, чтобы улучшить их механические свойства и сопротивление коррозии. Карбид титана обладает высокой твердостью и тугоплавкостью. Он входит в состав титано-вольфрамовых и инструментальных твердых сплавов. В последнее время очень важное значение приобретают сверхпроводящие сплавы ниобия с титаном.

Оригинальное применение получил титан в медицине — для изготовления внутренних протезов. Установлено, что присутствие титана в живом организме вполне допустимо, кости и мышечная ткань срастаются с ним.

Двуокись титана используют как белый пигмент титановых белил. Раньше в живописи применялись свинцовые белила. Со временем они портятся: темнеют и теряют кроющую способность. В результате этого картины многих выдающихся живописцев утратили свой первоначальный вид. Титановые же белила очень стойкие, и полотна наших выдающихся современников смогут сохраняться многие века.

В изготовлении твердых диэлектриков (производство конденсаторов, радиоаппаратуры и высокочастотных печей) используют различные кристаллические формы двуокиси титана — анатаз и рутил.

Метатитанат бария $BaTiO_3$ отличается сверхвысокой диэлектрической постоянной и применяется для изготовления электрических конденсаторов.

Известно не менее 65 минералов, содержащих титан, который находится обычно в четырехвалентной форме. Промышленное значение имеют минералы рутил, ильменит, перовскит и сфен. Рутил, анатаз и брукит — это аллотропические модификации двуокиси титана. Ильменит (метатитанат железа) $FeTiO_3$ и рутил TiO_2 — наиболее распространенные минералы титана, из которых его в основном получают.

Промышленное производство металлического титана началось с 1948 г. Сначала в США, затем в Англии и Японии, а с 1954 г. в СССР работают предприятия, выпускающие титан и его сплавы. Наша страна по производству титана вышла на одно из первых мест в мире.

Франций

Франций, подобно фтору, своеобразный «химический полюс» периодической системы Менделеева. Если фтор самый активный неметалл, то франций по своей химической активности не должен иметь равных среди всех известных металлов.

Но франций удивителен не только своими химическими свойствами. Необычна и его биография, которая напоминает приключенческую повесть. В земных минералах он содержится в столь ничтожных количествах, что эпитет «редкий» для характеристики его распространенности не подходит. Франций — редчайший, скорее даже ультраредчайший, элемент нашей планеты. Выделить природный франций дороже, чем приготовить элемент искусственно.

...Сто лет назад он был назван экацезием. Под таким именем предсказал его существование Менделеев. Шли годы. Элементы, предсказанные великим русским химиком, обнаруживались в природе. Они заполняли пустовавшие клетки периодической системы. А клетка под № 87 оставалась незанятой. И ученые никак не могли объяснить, почему экацезий так упорно сохраняет свое инкогнито.

Когда было открыто явление радиоактивности, появилась возможность дать такое объяснение. Ученые рассуждали: экацезий, как и его соседи по таблице, должен быть элементом радиоактивным, притом в очень сильной степени, т. е. иметь чрезвычайно короткую продолжительность жизни. А потому, заключали ученые, его нет на Земле. Просто он уже давным-давно распался, превратившись в более долгоживущие элементы.

Это, казалось бы, очевидное объяснение тут же порождало резонный вопрос: а почему, собственно, экацезий должен быть менее устойчивым, чем соседние с ним полоний и радон, радий и актиний? Почему природа сделала самый тяжелый щелочной металл таким нежизнеспособным?

Вопрос не получал ответа. Тем временем физики и химики тщательно разобрались в запутанной ситуации, которая возникла в результате открытия 30

Величественный памятник в честь покорителей космоса в Москве. Сооружен из титана — самого стойкого металла. Пройдут тысячелетия, но они не оставят ни малейшего следа на блестящей поверхности обелиска.

с лишним радиоактивных веществ (см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов»). Все эти вещества были сгруппированы в радиоактивные семейства, возникло четкое представление об изотопах. Но ни в одном из трех семейств не находилось места для изотопов экацезия.

Тогда появилась новая версия: по удивительной прихоти природы элемент № 87, возможно, и не является радиоактивным. Значит, он должен существовать на Земле, правда, в очень незначительных количествах. На страницах научных журналов время от времени стали мелькать короткие заметки о том, что экацезий якобы удалось обнаружить. Вслед за ними появились столь же короткие, но весьма решительные опровержения.

...В 1925 г. английский ученый С. Фриенд отправился в экспедицию на Мертвое море. Воды этого водоема отличаются наивысшей концентрацией растворенных солей, преимущественно хлоридов и сульфатов щелочных металлов. Фриенд тайно надеялся, что воды Мертвого моря могут оказаться уникальным резервуаром загадочного экацезия. Но ни в одной из нескольких сотен исследованных проб воды ученый не обнаружил даже следов этого элемента.

В начале 30-х годов научной сенсацией стали работы американского физика Ф. Эллисона. Он недвусмысленно заявлял, что благодаря изобретенному им новому, чрезвычайно чувствительному методу анализа проблема экацезия разрешилась. Неведомый элемент удалось обнаружить. В 87-й клетке таблицы появился символ Vi. «Виргиний» — такое название дал Эллисон элементу. А спустя короткое время выяснилось, что виргиний — это не более чем игра воображения.

...Теперь в любой энциклопедии, в любом учебнике по химии читаем: франций (порядковый № 87) открыт в 1939 г. французским ученым Маргаритой Пере. Кстати сказать, это третий случай, когда честь открытия нового элемента выпала женщине (раньше Мария Кюри открыла полоний и радий, Ида Ноддак — рений).

Но чтобы понять, как все же Пере удалось наконец поймать неуловимый элемент, нам придется вернуться на много лет назад. В 1914 г. три австрийских радиохимика — С. Мейер, Г. Гесс и Ф. Панет — занялись изучением радиоактивного распада изотопа актиния с массовым числом 227. Про него было известно, что он входит в семейство актиноурана и испускает β^--частицы; следовательно, продуктом его распада является торий. Однако у ученых мелькали смутные подозрения, что актиний-227 в редких случаях испускает также и α-частицы. Иными словами, здесь наблюдается один из примеров радиоактивной «вилки». Легко сообразить: в ходе такого превращения должен образовываться изотоп элемента № 87. Мейер и его коллеги действительно наблюдали α-частицы. Требовались дальнейшие исследования, но они были прерваны первой мировой войной.

Маргарита Пере шла по тому же пути. Но в ее распоряжении были более чувствительные приборы, новые, усовершенствованные методы анализа. Поэтому-то и сопутствовал ей успех.

Франций нередко относят к числу искусственно синтезированных элементов. Мы убедились, что подобное мнение ошибочно. Все-таки впервые элемент был обнаружен в природе. Это изотоп франция-223. Его период полураспада составляет всего 22 мин. Становится понятным, почему франция так мало на

Земле. Во-первых, из-за своей недолговечности он не успевает концентрироваться в сколь-либо заметных количествах, а во-вторых, сам процесс его образования отличается невысокой вероятностью: всего 1,2% ядер актиния-227 распадается с испусканием α-частиц.

В связи с этим франций выгоднее приготовлять искусственным путем. Уже получено (1972) 20 изотопов франция, и самый долгоживущий из них — франций-223.

Работая с совершенно ничтожными количествами солей франция, химики сумели доказать, что по своим свойствам он чрезвычайно похож на цезий.

Еще никто не держал в руках хотя бы крупицы металлического франция. И пока неизвестно, удастся ли ученым найти способ быстрого приготовления 87-го элемента в относительно больших количествах. Поэтому различные свойства металла удается определять лишь косвенно, а то и с помощью теоретических расчетов. Например, можно уверенно сказать, что после ртути франций — самый легкоплавкий металл. Правда, пока нельзя говорить о точном значении его температуры плавления: по одним данным она равна 20° С, а по другим — даже 8° С (!). Скорее всего при комнатной температуре франций является жидкостью. Хранить такую жидкость на воздухе было бы не только бессмысленно, но и небезопасно. Окисление металла должно протекать чрезвычайно бурно. Ученые вычислили и плотность франция; она около 2500 кг/м^3. Значит, он — самый тяжелый из щелочных металлов. Атомный радиус франция имеет наибольшее значение в этой группе. Поэтому франций исключительно легко расстается со своим единственным валентным электроном. Здесь и кроется причина его высочайшей химической активности.

В практической деятельности человека почти каждый химический элемент играет ту или иную роль. О франции пока можно говорить лишь в будущем времени. Используются только радиоактивные свойства его изотопов. Например, для определения содержания актиния в природных минералах. Интересны перспективы применения франция в биологических исследованиях, в частности для раннего установления раковых заболеваний. Ученые доказали, что франций интенсивно накапливается в опухолях. Он помогает распознать страшную болезнь в самом ее начале.

Плутоний

Посмотрите на фотографию (стр. 400), она была опубликована в 1944 г. Сразу и не поймешь, что на ней изображено. Подпись стояла такая: «20 микрограммов гидроокиси плутония (увеличено в 40 раз)». Рассмотреть ничтожное количество вещества на дне тончайшего капилляра без микроскопа оказалось невозможным. Фотография эта имеет огромное историческое значение — она отражает первые шаги в изучении химии поистине уникального химического элемента.

Судите сами. В 1940 г. американские физики Г. Сиборг и А. Валь с помощью ядерных реакций синтезировали первые атомы нового элемента с порядковым № 94. Сейчас мировое производство плутония измеряется многими сотнями килограммов. И когда говорят, что плутоний принадлежит к числу наиболее изученных представителей периодической системы Менделеева, то, поверьте, в этом утверждении нет никакого преувеличения по одной простой причине: плутоний является важным топливом ядерных реакторов (см. ст. «Атомный реактор»).

Его относят к искусственно синтезированным элементам. Но в то же время плутоний оказывается элементом с наибольшим порядковым номером из всех обнаруженных в природе, так сказать, своеобразной естественной верхней границей периодической системы. Он постоянно образуется в природе, хотя и в очень малых количествах.

Как это происходит? Благодаря различным природным ядерным реакциям (например, спонтанному делению урана) возникают свободные нейтроны. Они захватываются ядрами урана-238:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + n \longrightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U}.$$

А далее следует такая цепочка радиоактивных превращений:

$$^{239}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{93}\mathrm{Np} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{94}\mathrm{Pu}.$$

Ученые подсчитали, что на 1 г урана в урановых минералах приходится 10^{-12} г плутония. Общие же «ресурсы» природного плутония превышают 2500 т. Это обстоятельство весьма интересно: ведь если бы плутоний не был получен искусственно, его рано или поздно удалось бы обнаружить в природе.

Чистая гидроокись плутония (20 мкг) на дне капиллярной трубки. Увеличено в 40 раз.

Всего теперь известно 15 изотопов плутония. Знакомый уже нам ^{239}Pu имеет период полураспада 24 360 лет, но в плеяде плутониевых изотопов он не самый долгоживущий. Куда большей продолжительностью жизни обладают ^{242}Pu ($3{,}8 \cdot 10^5$ лет) и ^{244}Pu ($7{,}6 \cdot 10^7$ лет), но в природе они не образуются. Недавно в природе был обнаружен первичный плутоний-244. Зато с практической точки зрения плутоний-239 самый важный. Он легче других делится под действием медленных нейтронов, при этом выделяется огромная энергия.

На этом изотопе плутония были изучены свойства нового элемента. Изучение требовало огромных предосторожностей. Радиоактивность плутония настолько высока, что в обычной химической лаборатории с ним работать нельзя. Исследования ведут в специальных помещениях — так называемых горячих камерах. Все операции производятся с помощью дистанционного управления. Сам ученый не дотрагивается до колб и пробирок. Руки химика в «горячих лабораториях» заменены хитроумными рычагами и захватами. Иначе нельзя: радиоактивное излучение плутония опасно для жизни.

У плутония большое преимущество перед другими трансурановыми элементами. Его можно накапливать во внушительных количествах (благодаря образованию в урановых реакторах). Однако это вовсе не значит, что можно хранить слитки металлического плутония любых разумных размеров. Как и у урана, у плутония существует критическая масса. Плутониевый шар массой около 2,5 кг претерпел бы мгновенный ядерный взрыв. Однако плутоний не относится к тем материалам, которые залеживаются на складах...

Как химический элемент плутоний во многом необычен. Нет единого мнения относительно его места в менделеевской таблице. Одни ученые причисляют его к семейству актиноидов, другие относят к более малочисленной группе уранидов, третьи считают, что плутонию нужно предоставить самостоятельное место в восьмой группе периодической системы (см. ст. «Великий закон»). Химия плутония очень богата, поскольку он может выступать в различных валентных состояниях — от трехвалентного до шестивалентного. Плутоний-VI похож на уран, а плутоний-III имеет много общего с лантаноидами. Словом, плутоний заключает в себе обширную гамму свойств.

В 1967 г. советские ученые А. Д. Гельман, Н. Н. Крот и М. П. Мефодьева получили семивалентные соединения элемента. В химии трансурановых элементов этот результат рассматривается как открытие первостепенной важности. Он заставляет пересмотреть многие сложившиеся представления о закономерностях изменения свойств элементов в конце периодической системы.

Химики приготовили и изучили не менее 100 самых разнообразных соединений плутония, больше, чем для всех других трансуранов, вместе взятых.

По внешнему виду плутоний при комнатной температуре — белый блестящий металл. Если его нагревать до плавления, то с ним происходят удивительные превращения. Прежде чем металл станет жидкостью, он несколько раз изменит свою кристаллическую структуру. Такое явление, когда один и тот же элемент известен в разных кристаллических состояниях, называют аллотропией. У плутония шесть аллотропических модификаций (разновидностей). Подобного изобилия нет ни у одного из известных металлов.

При α-распаде плутония выделяется очень много тепла. Это тепло с помощью специальных преобразователей можно превратить в электрическую энергию. Особенно ценен в этом отношении короткоживущий изотоп плутония-238 (период полураспада 86,4 года). Он уже используется в изотопных источниках тока и для питания оборудования космических аппаратов.

Беседа о самом необыкновенном в мире веществе

Что такое вода

Такой вопрос может показаться не только странным, но и немного невежливым. Кто же этого может не знать? Всякий знает, что вода — это соединение водорода и кислорода. Вот ее всем известная формула H_2O

С водой очень хорошо знаком каждый, кто умывается по утрам, пьет чай, умеет плавать, любит бегать под дождем, не боясь промокнуть, катается на коньках и ходит на лыжах.

Сколько существует различных водородов!

В природе существует *три* различных водорода — три его изотопа. Самый легкий — ^1H. Химики его часто называют *протием*. Водород в обычной воде почти нацело состоит из протия. Кроме него во всякой воде есть тяжелый водород — *дейтерий* ^2H, его чаще в химии обозначают символом D. Дейтерия в воде очень мало. На каждые 6700 атомов протия в среднем приходится только один атом дейтерия. Кроме протия и дейтерия существует еще сверхтяжелый водород ^3H. Его обычно называют *тритием* и обозначают символом Т. Тритий радиоактивен, период его полураспада немного больше 12 лет. Он непрерывно образуется в стратосфере под действием космического излучения. Количество трития на нашей Земле исчезающе мало — меньше одного килограмма на всем земном шаре, но, несмотря на это, его можно обнаружить повсюду, в любой капле воды. Физики научились получать тритий искусственно в ядерных реакторах.

Ученые заподозрили, что возможно существование четвертого изотопа водорода ^4H и даже пятого ^5H. Эти изотопы тоже должны быть радиоактивными.

Сколько на свете кислородов!

В природе найдены три различных изотопа кислорода. Больше всего легкого кислорода ^{16}O, значительно меньше тяжелого ^{18}O и совсем мало кислорода ^{17}O. В кислороде воздуха, которым мы дышим, на каждые десять атомов ^{17}O приходится 55 атомов ^{18}O и более 26 000 атомов изотопа кислорода ^{16}O.

Физики сумели создать в своих ускорителях и реакторах еще пять радиоактивных изотопов кислорода: ^{13}O, ^{14}O, ^{15}O, ^{19}O и ^{20}O. Все они живут очень недолго и через несколько минут распадаются, превращаясь в изотопы других элементов.

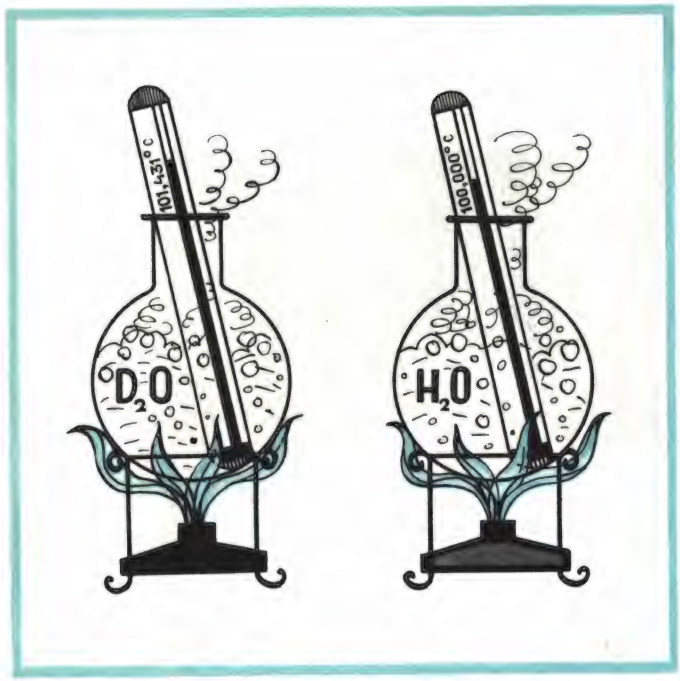
Сколько может быть различных вод!

Если подсчитать все возможные различные соединения с общей формулой H_2O, то результат покажется неожиданным: всего могут существовать *сорок восемь* разных вод. Из них *тридцать девять* вод будут радиоактивными, но и стабильных, устойчивых вод тоже будет немало — *девять*:

$$H_2{}^{16}O,\ H_2{}^{17}O,\ H_2{}^{18}O,\ HD{}^{16}O,\ HD{}^{17}O,\ HD{}^{18}O,$$
$$D_2{}^{16}O,\ D_2{}^{17}O,\ D_2{}^{18}O.$$

Если же окончательно подтвердится сообщение о том, что существует еще два сверхтяжелых изотопа водорода ^4H и ^5H, то будут возможны уже *сто двадцать* различных вод.

Но и это еще не все. Советские физики совсем недавно (1970) на большом ускорителе многозарядных ионов создали совершенно удивительный кислород — сверхтяжелый изотоп ^{24}O. В его ядре огром-



Тяжелая вода кипит при более высокой температуре, чем обычная вода...
...и замерзает при более высокой температуре.

ный избыток нейтронов, и оно очень неустойчиво. Если принять во внимание и этот новый изотоп кислорода, то тогда различных вод можно будет насчитать уже *сто тридцать пять!*

Подсчитайте сами, сколько различных вод, молекулы которых содержат тритий, может образовываться на границе с космосом и постепенно вместе с дождями выпадать на землю. Попробуйте сосчитать также, сколько различных радиоактивных вод возникает в воде, охлаждающей атомный реактор.

Где бы в мире ни зачерпнуть стакан воды, в нем всегда окажется смесь различных молекул, неодинаковых по изотопному составу. Конечно, вероятность образования молекул с разным изотопным составом далеко не одинакова. Молекулы, содержащие сразу два или три редко встречающихся изотопных атома, будут возникать так редко и их будет так мало, что, по мнению физиков, их пока можно не принимать во внимание.

Что же такое обыкновенная вода?

Такой воды в мире нет. Нигде нет обыкновенной воды. Она всегда необыкновенная. Даже по изотопному составу вода в природе всегда различна. Он зависит от истории воды — от того, что с ней происходило в бесконечном многообразии ее круговорота в природе. При испарении вода обогащается протием, и вода дождя поэтому отлична от воды озера.

Вода реки непохожа на морскую воду. В закрытых озерах вода содержит больше дейтерия, чем вода горных ручьев. В каждом источнике свой изотопный состав воды.

Когда зимой вода в озере замерзает, никто из тех, кто катается на коньках, и не подозревает, что изотопный состав льда изменился: в нем уменьшилось содержание тяжелого водорода, но зато повысилось содержание тяжелого кислорода. Поэтому вода из растаявшего льда уже другая и отличается от той воды, из которой лед был получен.

Если воду разложить химически и сжечь добытый из нее водород, то получится снова вода, но совсем другая, потому что в воздухе изотопный состав кислорода отличается от среднего изотопного состава кислорода воды. Но зато, в отличие от воды, изотопный состав воздуха один и тот же на всем земном шаре.

Вода в природе не имеет постоянного изотопного состава, она вечно меняется, и только поэтому нельзя сказать, что где-то есть какая-то обыкновенная вода.

Что такое легкая вода?

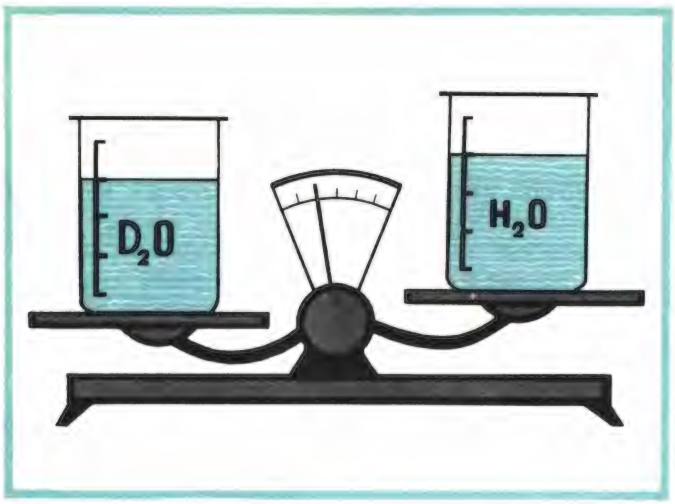
Это та самая вода, формулу которой знают все школьники — $^{1}H_2{}^{16}O$. Но такой воды в природе нет. Такую воду с огромным трудом приготовили ученые. Она им понадобилась для точного измерения свойств воды, и в первую очередь для измерения ее плотности.

Пока такая вода существует только в нескольких крупнейших лабораториях мира, где изучают свойства различных изотопных соединений.

Что такое тяжелая вода?

И этой воды в природе нет. Строго говоря, нужно было бы называть тяжелой воду, состоящую только из одних тяжелых изотопов водорода и кислорода $D_2{}^{18}O$, но такой воды нет даже и в лабораториях ученых. Пока она еще никому не нужна, и незачем ее готовить. Конечно, если тяжелая вода понадобится науке или технике, ученые сумеют найти способ, как ее получить: и дейтерия и тяжелого кислорода в природной воде сколько угодно.

В науке и ядерной технике принято условно называть *тяжелой водой* тяжеловодородную воду. Она содержит только дейтерий, в ней совсем нет обычного легкого изотопа водорода. Изотопный со-



Тяжелая вода потому и тяжелая, что тяжелее обычной. Ее плотность 1,104.

став по кислороду в этой воде соответствует составу кислорода воздуха.

Еще совсем недавно никто в мире и не подозревал, что такая вода существует, а теперь во многих странах мира работают гигантские заводы, перерабатывающие миллионы тонн воды, чтобы извлечь из нее дейтерий и получить чистую тяжелую воду.

Бывает ли полутяжелая вода?

Полутяжелой водой можно назвать воду со смешанными молекулами состава HDO. Она есть во всякой природной воде, но получить ее в чистом виде невозможно, потому что в воде всегда протекают реакции изотопного обмена. Атомы изотопов водорода очень подвижны и непрерывно переходят из одной молекулы воды в другую. Приготовить воду, средний состав которой будет соответствовать формуле полутяжелой воды, нетрудно. Но благодаря реакции обмена

$$2HDO \rightleftarrows H_2O + D_2O$$

она будет представлять собой смесь молекул с разным изотопным составом: H_2O, HDO, D_2O.

Что такое «нулевая» вода?

«Нулевая» вода состоит из чистого легкого водорода и кислорода воздуха. Эту воду физико-химики выбрали в качестве эталона: у нее очень постоянный состав. Ее не так уж трудно получать, и с ней удобно сравнивать воду неизвестного состава: определив разницу в плотности, легко найти содержание дейтерия.

А может быть, есть еще какая-нибудь вода?

Кроме всех перечисленных вод еще существует *тяжелокислородная вода* $H_2{}^{18}O$. Получать ее из природной воды очень сложно и трудно. До сих пор эту воду в чистом виде еще, пожалуй, никто не сумел приготовить.

Тяжелокислородная вода очень нужна для исследования многих биологических и химических процессов, поэтому довольно концентрированные растворы этой воды в воде обычной получают теперь на заводах.

А радиоактивная вода существует?

Да. Физики научились получать *тритиевую воду* искусственным путем в атомных реакторах. Из-за сильной радиоактивности эта вода очень опасна. Пока такая вода нужна только ученым.

Больше еще никаких вод не получено?

Больше нет. Просто потому, что все остальные возможные воды пока еще никому не нужны. Если понадобятся и они, без сомнения, наука найдет способ получать любую из них.

Много ли разных вод содержится в воде?

В какой воде? В той, что льется из водопроводного крана, куда она пришла из реки, тяжелой воды $D_2{}^{16}O$ около 150 г на тонну, а тяжелокислородной ($H_2{}^{17}O$ и $H_2{}^{18}O$ вместе) почти 1800 г на тонну воды. А в воде из Тихого океана тяжелой воды почти 165 г на тонну.

В тонне льда одного из больших ледников Кавказа тяжелой воды на 7 г больше, чем в речной воде, а тяжелокислородной воды столько же. Но зато в воде ручейков, бегущих по этому леднику, $D_2{}^{16}O$ оказалось меньше на 7 г, а $H_2{}^{18}O$ — на 23 г больше, чем в речной.

Тритиевая вода $T_2{}^{16}O$ выпадает на землю вместе с осадками, но ее очень мало — всего лишь 1 г на 10^{12} т (биллион тонн) дождевой воды. В океанской воде ее еще меньше.

Строго говоря, вода всегда и всюду разная. Даже в снеге, выпадающем в разные дни, разный изотопный состав. Конечно, отличие невелико. Всего 1—2 г на тонну. Только, пожалуй, очень трудно сказать — мало это или много.

В чем же различие между легкой, природной и тяжелой водой?

Ответ на этот вопрос будет зависеть от того, кому он задан. Каждый из нас не сомневается, что с водой-то он знаком хорошо.

Если каждому из нас показать три стакана с обычной, тяжелой и легкой водой, то каждый из нас даст совершенно четкий и определенный ответ: во всех трех сосудах простая чистая вода. Она одинаково прозрачна и бесцветна. Ни на вкус, ни на запах нельзя найти между ними никакой разницы. И это будет верно. Это все — вода.

Химик на этот вопрос ответит почти так же: между ними нет *почти* никакой разницы. Все их химические свойства *почти* неразличимы: в каждой из этих вод натрий будет одинаково выделять водород, каждая из них при электролизе будет одинаково разлагаться, все их химические свойства будут почти совпадать. Это и понятно: ведь химический состав у них одинаков. Это вода.

Физик не согласится. Он укажет на заметную разницу в их физических свойствах: и кипят и замерзают они при различных температурах, плотность у них разная, а давление их пара тоже немного различно. Правда, все эти различия малы. Изменения в изотопном составе очень мало влияют на физические свойства вещества.

Биолог, пожалуй, встанет в тупик и не сразу сумеет найти ответ. Ему нужно будет над вопросом о различии между водой с разным изотопным составом еще немало поработать. Совсем недавно все считали, что в тяжелой воде живые существа не могут жить. Ее даже *мертвой водой* называли. Но оказалось, что если очень медленно, осторожно и постепенно заменять протий в воде, где живут некоторые микроорганизмы, на дейтерий, то можно их приучить к тяжелой воде и они будут в ней неплохо жить и развиваться, но обычная вода станет для них вредной.

Кому же нужна тяжелая вода!

Человечеству! Оно уже стоит у порога, за которым ждет его страшная угроза энергетического голода. И вся надежда связана с тем, что будет решена проблема, как использовать для энергетики тяжелую воду.

Зачем нужна тяжелая вода теперь!

Все, что мы до сих пор говорили, касалось тех свойств, которые зависят от строения атомов, от их порядкового номера, от числа и расположения электрических зарядов в атомных ядрах и электронов в молекуле. Только это и определяет химическое поведение вещества. Строение молекулы не зависит от массы атомного ядра. Поэтому одинаковые молекулы с разным изотопным составом химически почти неразличимы.

Но сходство в свойствах изотопных соединений прекращается, когда вопрос касается кинетических и ядерных характеристик. Молекула, содержащая тяжелый изотопный атом, при той же температуре движется с меньшей скоростью, при столкновении таких частиц иначе протекает обмен кинетической энергией. А самое главное — это то, что изменяется способность вступать в ядерные превращения.

Вот эти-то свойства резко отличают тяжелую воду от любой другой воды с иным изотопным составом: ведь в ее состав входит тяжелый водород. В наши дни тяжелая вода успешно применяется в атомной энергетике для замедления нейтронов в ядерных реакторах.

Роль замедлителя в атомном котле очень важна. Когда ядро урана-235 распадается на два атомных ядра-осколка, из него одновременно вылетают два или три нейтрона. Скорость их огромна, она превышает 20 000 км/с. Эти быстрые нейтроны не могут сами вызвать новый распад в других атомах урана. Они пролетят мимо них с такой быстротой, что просто не успеют прореагировать. Нейтроны нужно замедлить примерно до 2,2 км/с, так, чтобы они пришли в равновесие с тепловым движением окружающих молекул. При этом энергия нейтронов должна уменьшиться почти в 60 млн. раз. Далеко не всякое вещество пригодно в качестве замедлителя. Выбор очень ограничен. Во-первых, оно не должно поглощать нейтроны, вступая само в ядерные реакции, а во-вторых, оно должно состоять обязательно из легких элементов с малыми массовыми числами. При соударении с тяжелым ядром скорость нейтрона почти не изменяется, точно так же как почти не изменяется скорость мяча, отскакивающего при ударе о стенку.

Самым лучшим замедлителем мог бы быть легкий водород, но он заметно поглощает нейтроны. Тяжелый водород их почти не поглощает. Нейтрону, попавшему в тяжелую воду, достаточно всего 25 раз столкнуться с тяжелым водородом, чтобы потерять свою высокую энергию и приобрести способность взаимодействовать с ураном. Неплохой замедлитель — углерод в форме графита, но нейтрону в нем приходится испытывать около 110 столкновений, чтобы утратить начальную скорость.

Использование тяжелой воды в качестве замедлителя позволяет конструкторам создавать очень эффективные, а главное, легкие и компактные атомные энергетические установки, особенно для их применения на транспорте.

Зачем еще нужна тяжелая вода!

Чтобы исследовать механизм многих химических, физических и биологических процессов. Это, конечно, скромное, но очень важное применение тяжелой воды. Наверное, нет ни одного природного процесса, в котором не принимала бы участие вода или водород. Атомы тяжелого водорода наиболее важные меченые атомы. Их, как разведчиков в бой, направляют химики в исследуемую реакцию, чтобы проследить за ее ходом. В наши дни уже возникла и быстро развивается самостоятельная область науки — химия изотопного обмена. Наиболее важная ее задача — изучать с помощью дейтерия механизм химических реакций при получении органических соединений и исследовать их строение.

Почему же человечеству будет нужна именно тяжелая вода!

Чтобы ответить на этот вопрос, нельзя обойтись без самого замечательного языка — без языка цифр и формул. Он понятен всем по-настоящему грамотным людям, в какой бы стране они ни жили и на

каком бы языке ни разговаривали. Для химиков теперь очень точно измерены массы всех изотопных атомов. Вот некоторые значения этих масс:

протий $^1_1\mathrm{H}$ $M = 1{,}007\,825$
дейтерий $^2_1\mathrm{D}$ $M = 2{,}014\,102$
тритий $^3_1\mathrm{T}$ $M = 3{,}016\,049$

Физики сумели установить возможность ядерных реакций между легкими атомами, в том числе возможность реакций между атомами дейтерия:

$$^2_1\mathrm{D} + {}^2_1\mathrm{D} = {}^1_1\mathrm{H} + {}^3_1\mathrm{T}.$$

К такой реакции неприменим закон сохранения массы, каким представляла его старая химия,— в результате реакции получается недостача:

$2 \times 2{,}014\,102 - 1{,}007\,825 - 3{,}016\,049 = 0{,}004\,330$ г.

Это немалая недостача, она означает, что если бы удалось найти условия, при которых может протекать реакция между двумя молями тяжелого водорода, то, согласно уравнению Эйнштейна $E = \Delta mc^2$, можно было бы получить энергию:

$$0{,}00433 \cdot (3{,}0 \cdot 10^{10})^2 \text{ Дж} = 3{,}9 \cdot 10^{11} \text{ Дж}.$$

Это немалая энергия. В наше время, чтобы получить такую энергию, приходится сжигать в топках котлов ни много ни мало 13,5 т первосортного угля. А ведь его еще нужно добыть и доставить к топке.

Между тем в соответствии с уравнением ядерной реакции такую энергию можно получить при затрате всего лишь 2 молей атомов дейтерия, которые содержатся в 1 моле тяжелой воды. А тяжелая вода есть в любой природной воде. Следовательно, простой воды потребуется

$$\frac{6700 \cdot 18}{1000} \text{ кг} = 120{,}6 \text{ кг},$$

или приблизительно 120 л. Значит, из *одного литра* обычной воды можно добыть больше энергии, чем можно получить ее из *ста килограммов* высококачественного угля. А запасы воды на нашей Земле неисчерпаемы.

Что же мешает получать энергию из воды!

Такая возможность пока что кажется фантастической, но она вполне реальна. На пути к ее осуществлению наука преодолела немало трудностей. Уже решена сложнейшая проблема, как извлекать тяжелую воду из природной. Теоретически уже исследованы и рассчитаны условия, при которых возможны ядерные реакции между легкими атомами.

Но, к сожалению, исследователи встретили много трудностей. Насколько они серьезны, может показать прямой расчет: чтобы два атома могли вступить в ядерную реакцию, их ядра должны столкнуться, т. е. сблизиться до расстояния, начиная с которого межъядерные силы уже могут преодолеть электростатическое отталкивание — примерно до 10^{-14} м.

Но ядра атомов защищены, как броней, своими электронными оболочками. Эти оболочки простираются на расстояние в десятки тысяч раз большее. А самое главное — ядра заряжены и отталкиваются друг от друга, как и все одноименно заряженные тела. Энергию, необходимую для того, чтобы преодолеть их взаимное отталкивание, рассчитать нетрудно. Из закона Кулона следует, что потенциальная энергия (в джоулях) двух ядер, сблизившихся на расстояние 10^{-14} м, должна быть равна:

$$\frac{Z_1 \cdot Z_2\,(1{,}6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 9 \cdot 10^9}{10^{-14}} \text{ Дж} = 2{,}3 \cdot 10^{-14} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \text{ Дж},$$

если между собой сталкиваются элементы с атомными номерами Z_1 и Z_2.

Конечно, мир атомных величин не очень привычен и нагляден, и трудно сразу представить себе, какова же эта энергия — мала или не очень мала. Но легко сообразить, с какой скоростью должны сталкиваться атомы, чтобы преодолеть потенциальную энергию электростатического отталкивания. Они должны обладать не меньшей кинетической энергией или по крайней мере равной. Следовательно, можно написать:

$$\frac{1}{2} mv^2 = 2{,}3 \cdot 10^{-14} \cdot Z_1 \cdot Z_2.$$

Массу одного атома можно найти из значения атомной массы, зная, сколько атомов содержится в 1 моле:

$$m = \frac{A}{6{,}02 \cdot 10^{23}}.$$

Можно найти и скорость, с которой должны столкнуться атомы, чтобы могла начаться ядерная реакция:

$$V = 5{,}3 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{A}}.$$

У дейтерия атомный номер $Z = 1$. Масса изотопа $A = 2$, следовательно, скорость атомов должна быть: $V = 3{,}8 \cdot 10^6$ м/с, или 3800 км/с. При обычной температуре физикам известна средняя скорость теплового движения у атомов дейтерия, она равна всего лишь 1,9 км/с. При комнатной температуре, равной примерно 293 К, кинетическая энергия молекул возрастает пропорционально термодинамической температуре, или, что то же самое, пропорционально квадрату скорости. Следовательно, чтобы средняя скорость молекул дейтерия была достаточной для реакции между ядрами, нужно нагреть тяжелый водород до температуры:

$$T = 293 \cdot \frac{3800^2}{1{,}9^2} \text{ К} = 1{,}2 \cdot 10^9 \text{ К}.$$

Итак, сталкиваться и реагировать между собой могут только ядра дейтерия, *«нагретые» до температуры свыше миллиарда кельвинов*. Вот в этом-то и заключается довольно серьезное затруднение для подлинных героев науки — физиков, посвятивших свою жизнь труднейшей и величественнейшей из проблем — обеспечить энергией будущие поколения.

Быть может, тяжелую воду можно чем-нибудь заменить!

Ничем. Тяжелая вода как источник тяжелого водорода для термоядерных реакций с целью получения энергии, по-видимому, незаменима. Это следует из того, что необходимая для начала реакции температура очень сильно возрастает по мере увеличения атомного номера элемента. В самом деле, попробуйте сами подсчитать, какой температуре будет соответствовать кинетическая энергия частиц, способных преодолеть электростатическое отталкивание ядер атомов бериллия или кремния. Часть дейтерия можно заменить на тритий, но этого изотопа в природе почти нет, а получать его очень сложно и дорого.

Неужели же это все-таки возможно!

Очень трудно, но возможно. Во-первых, природа и физика идут навстречу исследователям: чтобы началась реакция, не нужно, чтобы *весь газ* был нагрет до такой немыслимо чудовищной температуры. Достаточно, если *отдельные атомы* будут обладать в нем столь высокой энергией.

Во всяком газе при любой температуре есть частицы с разными скоростями, от очень малых до очень больших. Благодаря этому реакция между атомами дейтерия будет идти с достаточной скоростью даже и при температуре в несколько раз меньшей чем 10^9 К. Это намного облегчает задачу.

Кроме того, существует так называемый туннельный эффект, благодаря которому всегда есть некоторая вероятность, что реакция между ядрами все же может произойти, даже если их кинетическая энергия будет несколько ниже, чем необходимо для преодоления электростатического отталкивания.

Поэтому для начала термоядерного процесса между ядрами тяжелого водорода оказывается вполне достаточной температура всего только в *триста миллионов кельвинов* (!). Если же вести реакцию между дейтерием и тритием, то будет достаточно и *сорока миллионов кельвинов*.

Как же это будет сделано!

Это уже сделано. Физики осуществили реакцию термоядерного взрыва, в которой температура, необходимая для начала ядерного синтеза более тяжелых элементов из легких ядер, достигается взрывом атомного заряда — запалом.

Но очень, очень много осталось еще сделать. Ведь нужен человечеству не взрыв, а управляемая реакция — источник энергии для промышленности, для транспорта, для всего, что будет необходимо обществу будущего. Нужна термоядерная «топка» — «топка» с температурой в сотни миллионов кельвинов.

Можно быть уверенным, что эта еще более фантастическая задача будет решена. Физики в нашей стране первыми нашли поистине совершенно удивительный путь к созданию термоядерного реактора. Они доказали, что такая «топка» возможна, хотя в природе нет и не может быть материала, способного выдержать такую температуру. Молекулы любого вещества, атомы любого элемента при таком немыслимо чудовищном «жаре» полностью разрушаются и теряют все свои электроны. Все вещества полностью превращаются в плазму — газ, состоящий не из молекул и даже не из атомов, а из свободных атомных ядер и свободных электронов. И несмотря на эту, казалось бы, полную принципиальную невозможность решения, наши ученые нашли путь, как создать такую топку для термоядерного реактора. Они доказали, что ее стенками могут служить мощные электромагнитные поля. Неощутимые, невидимые, прозрачные, они будут непроницаемы для ядер тяжелого водорода и для любых других элементов даже при ста, а может быть, и больше миллионов кельвинов.

На сколько времени хватит человечеству энергии, скрытой в воде!

Не менее чем на миллиард лет.

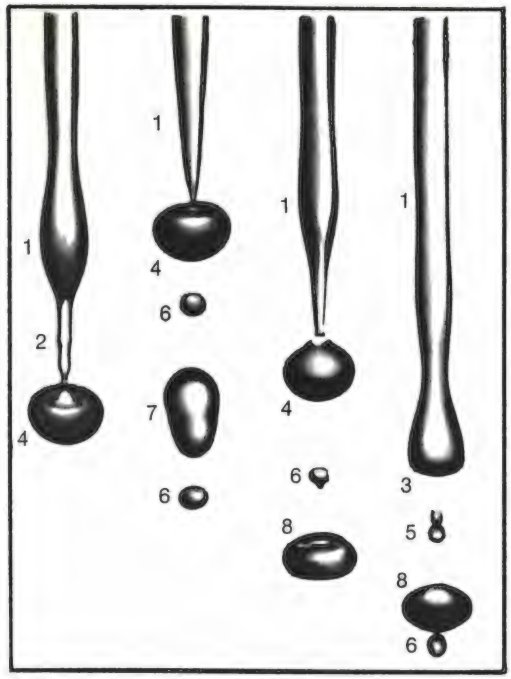
Свойства воды

Почему вода — вода!

Этот вопрос совсем не так неразумен, как это может показаться. В самом деле, разве вода — это только та бесцветная жидкость, что налита в стакан?

Океан, покрывающий почти всю нашу планету, всю нашу чудесную Землю, на которой миллионы лет назад зародилась жизнь,— это вода. Тучи, облака, туманы, несущие влагу всему живому на земной поверхности,— это ведь тоже вода. Бескрайние ледяные пустыни полярных областей, снеговые покровы, застилающие почти половину планеты,— и это вода.

Прекрасно, невоспроизводимо бесконечное многообразие красок солнечного заката, его золотых и багряных переливов; торжественны и нежны краски

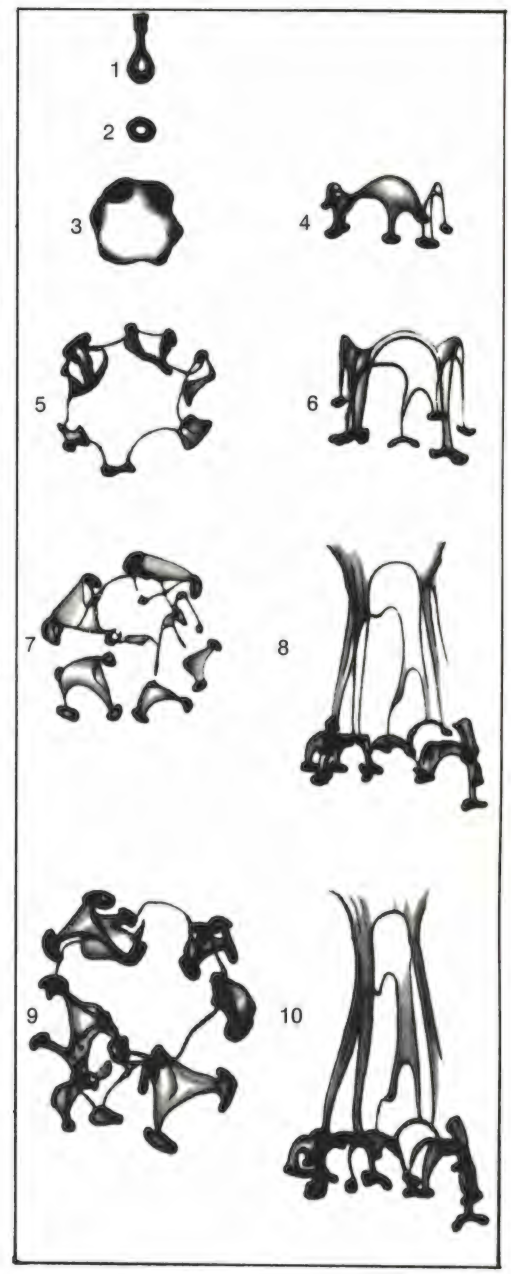


Так льется вода

На этих снимках сфотографирован конец очень тонкой водяной струи. На поверхности струи возникают волнообразные упругие колебания (*1*). Они усиливаются, и образуется тонкая перетяжка (*2*), она разрывается. Утолщение струи (*3*), находившееся перед перетяжкой, превращается в каплю (*4*), а то, что было перетяжкой, оттягивается (*5*) и становится маленькой капелькой (*6*). Она названа шариком Плато, по имени бельгийского физика, который сумел предсказать существование этой капельки задолго до того, как ученые смогли ее рассмотреть.

Под действием поверхностного натяжения капля колеблется. Она то вытягивается (*7*), то, снова расширяясь, сплющивается (*8*). Ее колебания хорошо изучены. Они в свое время помогли физикам разгадать тайну деления атомного ядра.

Распад струи жидкости на капли имеет очень большое значение в технике, поэтому его тщательно изучают. Механизм образования капель влияет на эффективность использования горючего при впрыскивании его в двигатель внутреннего сгорания. От распада струи зависит и мощность двигателя. (Снимки сделаны выдержкой в одну миллионную долю секунды. Они увеличены в 10 раз.)



На этих фотографиях, сделанных специально для Детской энциклопедии, показано, что происходит с каплей. Капля (*1*), упав с кончика пипетки в воду, превращается в вихревое кольцо (*2*). Оно расширяется, и в нем возникают утолщения (*3*). Постепенно они развиваются во вторичные вихревые колечки *(4, 5, 6)*. Процесс повторяется, и число колечек быстро растет *(7, 8, 9, 10)*. В такую сложную систему вихревых потоков капля превращается всего за несколько минут.

Слева — процесс снят сверху, *справа* — сбоку. Это удивительное явление еще почти не известно и не изучено. Может быть, кто-либо из читателей исследует его и откроет законы, которые им управляют? Кто знает, к каким последствиям это приведет в будущем.

Капля воды, упавшая в воду

Это изящное и загадочное явление каждый из нас может наблюдать. Для этого нужно очень осторожно уронить подкрашенную каплю с высоты 1—2 см в прозрачную банку с водой, которая перед опытом простояла несколько часов вдали от источника тепла, и в ней прекратилось конвекционное движение.

Правильное кристаллическое строение льда выражается в изумительном изяществе снежинок.

небосвода при восходе солнца. Эта обычная и всегда необыкновенная симфония цвета обязана рассеянию и поглощению солнечного спектра водяными парами в атмосфере. Этот великий художник природы — вода.

Горные цепи сложены гигантскими толщами сотен различных горных пород, и геологи знают, что большинство из них создано величайшим строителем природы — водой. Непрерывно изменяется облик Земли. На месте, где возвышались высочайшие горы, расстилаются бескрайние равнины, их создает великий преобразователь — вода.

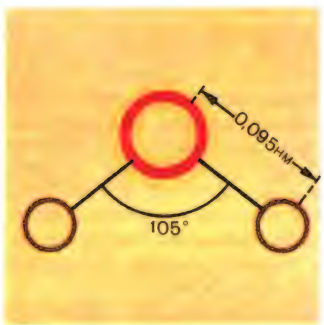
Безгранично многообразие жизни. Она всюду на нашей планете. Но жизнь есть только там, где есть вода.

Почему же одно из бесчисленных химических соединений, молекула которого состоит всего из 3 атомов,— простая окись водорода, самая обычная вода, занимает столь особое место в жизни природы? Чем объясняется такая исключительная роль воды?

Среди необозримого множества веществ вода с ее физико-химическими свойствами занимает совершенно особое, исключительное место. Это надо понимать буквально. Почти все физико-химические свойства воды — исключение в природе. Она действительно самое удивительное вещество на свете. Она удивительна не только многообразием изотопных форм молекулы и не только надеждами, которые связаны с ней как с неиссякаемым источником энергии будущего. Она удивительна своими самыми обычными свойствами. Простое химическое соединение с простейшей формулой H_2O заняло особое место на нашей чудесной планете благодаря изумительному сочетанию необычайных свойств.

Как построена молекула воды?

Как построена одна молекула воды, теперь известно очень точно. Она построена вот так:



Хорошо изучено и измерено взаимное расположение ядер атомов водорода и кислорода и расстояние между ними. Оказалось, что молекула воды нелинейна. Вместе с электронными оболочками атомов молекулу воды, если на нее взглянуть «сбоку», можно было бы изобразить вот так:

а если взглянуть «сверху» — со стороны атома кислорода, то так:

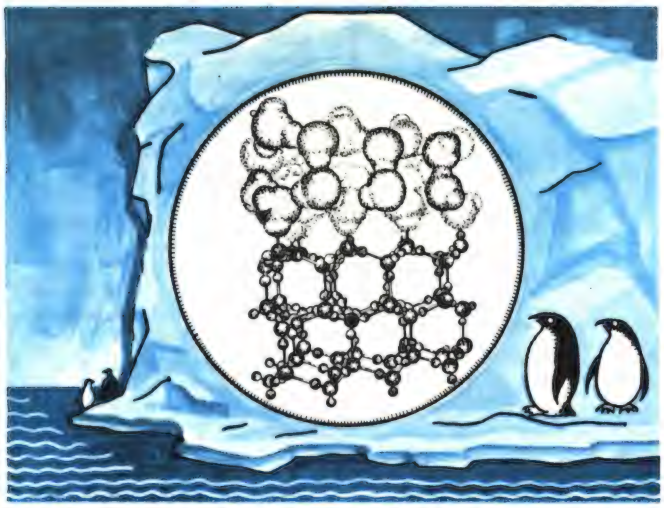
т. е. геометрически взаимное расположение зарядов в молекуле воды можно изобразить в виде простого тетраэдра.

Такое строение ведет к возникновению необычайно сильного взаимного притяжения молекул воды друг к другу: каждая молекула воды может образовать четыре одинаковые водородные связи с другими молекулами воды.

Все молекулы воды с любым изотопным составом построены совершенно одинаково.

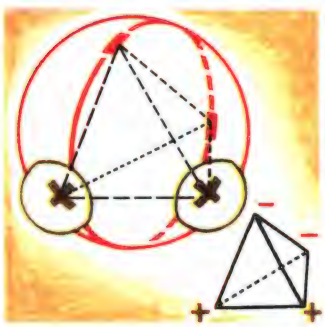
Как построена молекула льда?

Никаких особых молекул льда нет. Молекулы воды благодаря своему замечательному строению соединены в куске льда друг с другом так, что каждая из них связана и окружена четырьмя другими мо-



Внизу (в круге) — схематическое расположение атомных ядер водорода и кислорода в молекулах воды, образовавших кристаллическую решетку льда.

Вверху (в круге) — молекулы воды, образовавшие ледяной кристалл с сохранением масштабов электронных оболочек. Обратите внимание на рыхлую структуру льда.



Положительные заряды в молекуле воды связаны с атомами водорода. Отрицательные заряды — это валентные электроны кислорода. Их взаимное расположение в молекуле воды можно изобразить в виде простого тетраэдра.

лекулами. Это приводит к возникновению очень рыхлой структуры льда, в которой остается очень много свободного объема. Правильное кристаллическое строение льда выражается в изумительном изяществе снежинок и красоте морозных узоров на замерзших оконных стеклах.

Как же все-таки построены молекулы воды в воде!

К сожалению, этот очень важный вопрос изучен далеко не достаточно. Строение молекул в жидкой воде очень сложно. Когда лед плавится, его сетчатая структура частично сохраняется в образующейся воде. Молекулы в талой воде состоят из многих простых молекул — из агрегатов, сохраняющих свойства льда. При повышении температуры часть их распадается, их размеры становятся меньше.

Взаимное притяжение ведет к тому, что средний размер сложной молекулы в жидкой воде значительно превышает размеры одной молекулы воды. Такое необычайное молекулярное строение воды обусловливает ее необычайные физико-химические свойства.

При какой температуре вода должна кипеть!

Этот вопрос, конечно, странен. Ведь вода кипит при нормальном атмосферном давлении при ста градусах. Это знает каждый. Больше того, всем известно, что именно температура кипения воды при этих условиях и выбрана в качестве одной из опорных точек температурной шкалы Цельсия, условно обозначенной 100° С.

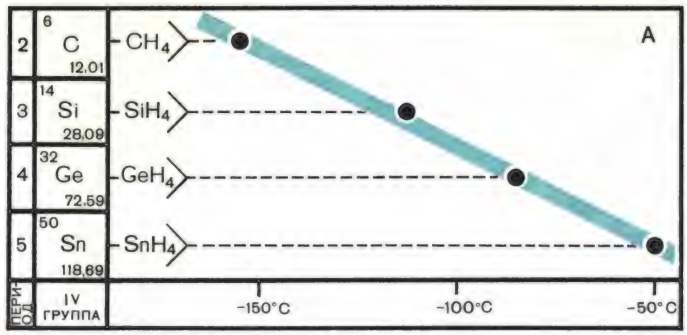
Однако вопрос поставлен иначе: при какой температуре вода должна кипеть? Ведь температуры кипения различных веществ не случайны. Они зависят от положения элементов, входящих в состав их молекул, в периодической системе Менделеева.

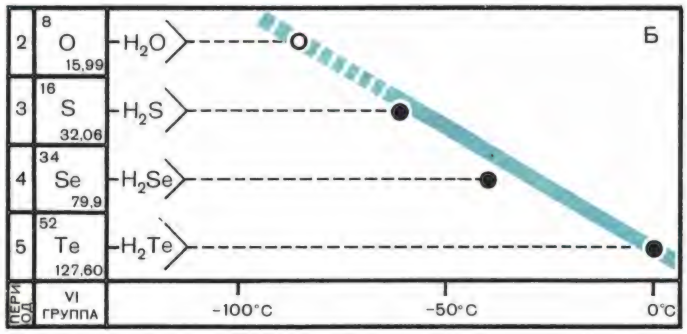
Если сравнивать между собой одинаковые по составу химические соединения различных элементов, принадлежащих к одной и той же группе таблицы Менделеева, то легко заметить, что чем меньше атомный номер элемента, чем меньше атомная масса, тем ниже температура кипения его соединений. Вода по химическому составу может быть названа гидридом кислорода. H_2Te, H_2Se и H_2S — химические аналоги воды.

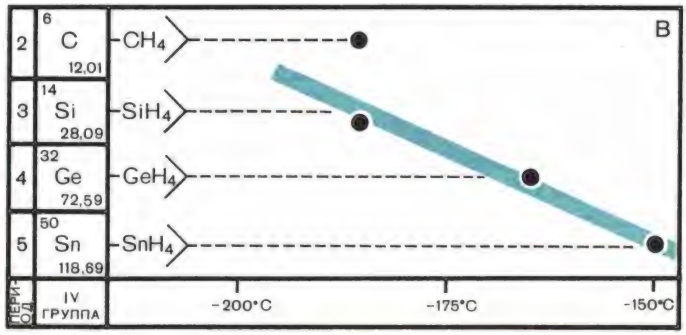
Если проследить за температурами их кипения и сопоставить, как изменяются температуры кипения гидридов в других группах периодической системы, то можно довольно точно определить температуры кипения любого гидрида, так же как и любого другого соединения. Сам Менделеев таким способом предсказывал свойства химических соединений еще не открытых элементов.

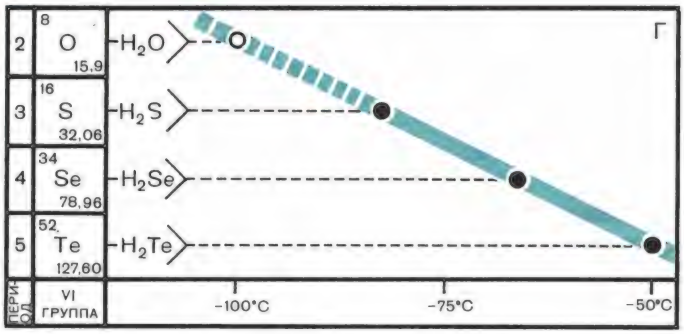
Если же определить температуру кипения гидрида кислорода по положению его в периодической таблице, то окажется, что вода должна кипеть при —80° С. Следовательно, вода кипит приблизительно на *сто восемьдесят градусов выше*, чем должна кипеть. Температура кипения воды — это наиболее обычное ее свойство — оказывается необычайным и удивительным.

Попробуйте теперь представить себе, что наша вода потеряла вдруг способность образовывать сложные, ассоциированные молекулы. Тогда она, вероятно, должна была бы кипеть при той температуре, какая ей положена в соответствии с периодическим законом. Что бы тогда стало на нашей Земле? Океаны внезапно закипят. На Земле не останется ни одной









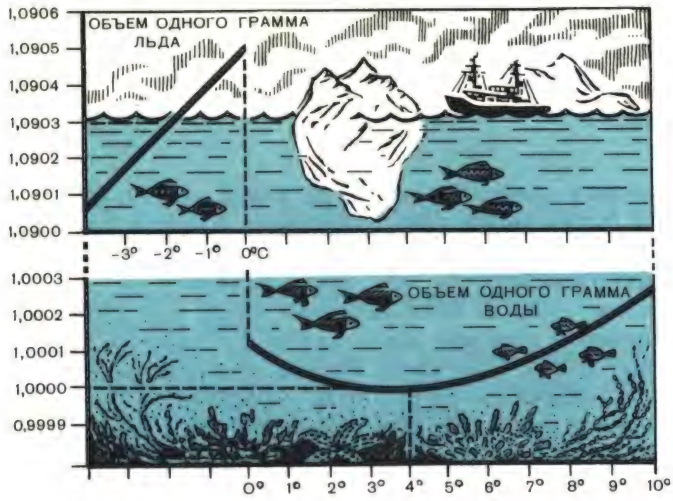
Свойства любого химического соединения зависят от природы образующих его элементов и, следовательно, от их положения в таблице Менделеева. На этих графиках приведены зависимости температур кипения и плавления водородных соединений элементов IV и VI групп периодической системы. Вода является поразительным исключением. Благодаря очень малому радиусу протона силы взаимодействия между ее молекулами столь велики, что разделить их очень трудно, поэтому вода кипит и плавится при аномально высоких температурах. Кроме воды в значительно меньшей степени аномальными свойствами обладают аммиак и фтористый водород. График *А*. Нормальная зависимость температуры кипения гидридов элементов IV группы от их места в таблице Менделеева. График *Б*. Среди гидридов элементов VI группы вода обладает аномальными свойствами: должна была бы кипеть при минус 80 — минус 90° С, а кипит при плюс 100° С. График *В*. Нормальная зависимость температуры плавления гидридов элементов IV группы от их положения в таблице Менделеева. График *Г*. Среди гидридов элементов VI группы вода нарушает порядок: должна была бы плавиться при минус 100° С, а ледяные сосульки тают при 0° С.

капли воды, а на небе никогда не сможет больше появиться ни одного облачка... Ведь в атмосфере земного шара температура нигде не падает ниже минус 80 — минус 90° С.

При какой температуре вода замерзает!

Не правда ли, вопрос не менее странен, чем предыдущий? Ну кто же не знает, что вода замерзает при 0° С? Это вторая опорная точка термометра. Это самое обычное свойство воды. Но ведь и в этом случае можно спросить: при какой температуре вода должна замерзать в соответствии со своей химической природой? Оказывается, гидрид кислорода на основании его положения в таблице Менделеева должен был бы затвердевать при *ста градусах ниже нуля*.

Вода на самом деле очень удивительное вещество. Ее, пожалуй, даже можно назвать непослушным веществом. Она не подчиняется многим физико-химическим закономерностям, справедливым для других соединений, потому что взаимодействие ее молекул необычайно велико и требуется особенно интенсивное тепловое движение молекул, чтобы преодолеть до-



На графике показано, как изменяются с температурой объемы одного грамма льда и жидкой воды. Эти изменения очень малы, но они имеют большое значение для жизни природы. Такой странной и удивительной зависимостью плотности от температуры обладает только вода. Обратите внимание еще на одно удивительное свойство воды — огромное расширение льда при замерзании. Оно так велико, что графически на одном чертеже представить изменение объема воды при замерзании невозможно. У тяжелой воды температурный ход изменения плотности аналогичен, но замерзает она при 3,8° С и наибольшей плотностью обладает при 11,6° С.

полнительное притяжение. Это и приводит к такому неожиданному и резкому повышению температур ее кипения и плавления.

Попробуйте и на этот раз пофантазировать. Вдруг исчезнет способность молекул воды к ассоциации. Немедленно на всей нашей планете исчезают снега и льды. Нельзя кататься на коньках, негде бегать на лыжах; впрочем, и некому тогда было бы кататься и бегать.

Полагается ли воде быть на Земле жидкой или твердой!

Нет, не полагается. Из того, что температура плавления и кипения гидрида кислорода — его аномальное свойство, следует, что в условиях нашей Земли жидкое и твердое состояния его также аномалии. Нормальным должно было бы быть только газообразное состояние воды.

Невозможным жителям невозможного мира, в котором все свойства воды были бы «нормальны», пришлось бы строить специальные сложные машины, чтобы сжижать такую воду, подобно тому как это делаем мы, получая жидкий кислород.

Самые обычные свойства воды оказываются необычайными и удивительными, если как следует с ними познакомиться и хорошо в них разобраться.

Сколько существует газообразных состояний воды!

Только одно — пар.

Сколько существует жидких состояний воды!

На такой вопрос не так просто ответить. Конечно, тоже одно — привычная нам всем жидкая вода. Но вода в жидком состоянии обладает такими необыкновенными свойствами, что приходится задуматься: правилен ли такой простой, казалось бы, не вызывающий никаких сомнений ответ? Вода — единственное в мире вещество, которое после плавления вначале сжимается, а затем по мере повышения температуры начинает расширяться. Примерно при 4° С у воды наибольшая плотность. Эту редкостную аномалию в свойствах воды объясняют тем, что в действительности жидкая вода представляет собой сложный раствор совершенно необычайного состава: это раствор воды в воде.

При плавлении льда сначала образуются крупные сложные молекулы воды. Они сохраняют остатки рыхлой кристаллической структуры льда и растворены в обычной низкомолекулярной воде. Поэтому сначала плотность воды низкая, но с повышением температуры эти большие молекулы разрушаются, и поэтому плотность воды растет, пока не начинает преобладать обычное тепловое расширение, при котором плотность воды снова падает. Если это верно, то возможно несколько состояний воды, только их никто не умеет разделить. И пока неизвестно, удастся ли когда-нибудь это сделать.

Такое необычайное свойство воды имеет огромное значение для жизни. В водоемах перед наступлением зимы постепенно охлаждающаяся вода опускается вниз, пока температура всего водоема не достигнет 4° С. При дальнейшем охлаждении более холодная вода остается сверху, и всякое перемешивание прекращается. В результате создается необычайное положение: тонкий слой холодной воды становится как бы «теплым одеялом» для всех обитателей подводного мира. При 4° С они чувствуют себя явно неплохо.

Что должно быть легче — вода или лед!

Кто же этого не знает... Ведь лед плавает на воде. В океане плавают гигантские айсберги. Озера зимой покрыты плавающим сплошным слоем льда. Конечно, лед легче воды. Но почему «конечно»? Разве это так ясно? Наоборот, объем всех твердых тел при плавлении увеличивается, и они тонут в своем собственном расплаве. А вот лед плавает в воде. Это свойство воды — аномалия в природе, исключение, и притом совершенно замечательное исключение.

Попробуем вообразить, как выглядел бы мир, если бы вода обладала нормальными свойствами и лед был бы, как и полагается любому нормальному веществу, плотнее жидкой воды. Зимой намерзающий сверху, более плотный лед тонул бы, непрерывно опускаясь на дно водоема. Летом лед, защищенный толщей холодной воды, не мог бы растаять. Постепенно все озера, пруды, реки, ручьи промерзли бы нацело, превратившись в гигантские ледяные глыбы. Наконец, промерзли бы моря, а за ними и океаны. Наш

прекрасный цветущий зеленый мир стал бы сплошной ледяной пустыней, кое-где покрытой тонким слоем талой воды. Чудесной аномалией обладает наше удивительное вещество.

Сколько существует льдов!

В природе на нашей Земле — один: обычный лед. Это самый прекрасный из всех минералов. Никакие алмазы не могут сравниться блеском и красотой со снежинками, искрящимися на солнце. Из этого голубовато-зеленого камня сложены на Земле не только горы и колоссальные ледники, им покрыты целые материки. Лед — горная порода с необычайными свойствами. Он твердый, но течет как жидкость, существуют огромные ледяные реки, медленно стекающие с гор. Лед необычайно прочен и долговечен — десятки тысячелетий хранит он в себе без изменений тела мамонтов, погибших в ледниковых трещинах.

В своих лабораториях человек сумел открыть еще по крайней мере шесть различных, не менее удивительных льдов. В природе их найти нельзя. Они могут существовать только при очень высоких давлениях. Обычный лед сохраняется до давления 208 МПа (мегапаскалей), но при этом давлении он плавится при —22° С. Если давление выше чем 208 МПа, возникает плотный лед — лед-III. Он тяжелее воды и тонет в ней. При более низкой температуре и большем давлении — до 300 МПа — образуется еще более плотный лед-II. Давление сверх 500 МПа превращает лед в лед-V — этот лед можно нагреть до 0° С, и он не растает, хотя и находится под огромным давлением. При давлении около 2 ГПа (гигапаскалей) возникает лед-VI. Это буквально горячий лед — он выдерживает, не плавясь, температуру 80° С. Лед-VII, найденный при давлении 3 ГПа, пожалуй, можно назвать раскаленным льдом. Это самый плотный и тугоплавкий из известных льдов. Он плавится только при 190° С. Некоторые ученые подозревают, что существует еще неустойчивый лед-IV, быстро переходящий в лед-V.

Наверно, человек, расширяя свои познания, сумеет в будущем найти еще не один вид льда.

Что нужно, чтобы лед растаял!

Очень много тепла. Гораздо больше, чем для плавления такого же количества любого другого вещества.

Исключительно большое значение удельной теплоты плавления 335 Дж на 1 г льда — также аномальное свойство воды. При замерзании 1 кг воды такое же количество тепла снова выделяется.

Когда наступает зима, образуется лед, выпадает снег и вода отдает обратно тепло, подогревает землю

Откуда на Земле взялась вода!

Вечно по всем направлениям Вселенную пронизывают потоки космических лучей— потоки частиц с огромной энергией. Больше всего в них протонов — ядер атомов водорода. В своем движении в космосе наша планета непрерывно подвергается «протонному обстрелу». Пронизывая верхние слои земной атмосферы, протоны захватывают электроны, превращаются в атомы водорода и немедленно вступают в реакцию с кислородом, образуя воду. Расчет показывает, что ежегодно почти полторы тонны такой «космической» воды рождается в стратосфере. На большой высоте при низкой температуре упругость водяного пара очень мала и молекулы воды, постепенно накапливаясь, конденсируются на частицах космической пыли, образуя таинственные серебристые облака. Ученые предполагают, что они состоят из мельчайших ледяных кристалликов, возникших из такой космической воды. Подсчет показал, что воды, появившейся таким образом на Земле за всю ее историю, как раз хватило бы, чтобы родились все океаны нашей планеты. Значит, вода пришла на Землю из космоса? Но...

Геохимики не считают воду небесной гостьей. Они убеждены, что у нее земное происхождение. Породы, слагающие земную мантию, которая лежит между центральным ядром Земли и земной корой, под влиянием накапливающегося тепла радиоактивного распада изотопов местами расплавлялись. Из них выделялись летучие составные части: азот, хлор, соединения углерода, серы, больше всего выделялось водяных паров. Сколько же воды могли выбросить при извержениях все вулканы за все время существования нашей планеты? Ученые подсчитали и это. Оказалось, что такой изверженной «геологической» воды тоже как раз хватило бы, чтобы заполнить все океаны.

Интересно все-таки было бы знать: откуда же на Земле взялась вода?

и воздух. Они противостоят холоду и смягчают переход к суровой зиме, к жестоким морозам. Именно благодаря этому замечательному свойству воды на нашей планете существуют осень и весна.

Что такое снежинки?

Сростки ледяных кристалликов, образовавшиеся при конденсации водяного пара в верхних слоях атмосферы, где очень низкая температура.

Почему же они такие красивые?

В кристаллической решетке льда есть плоскости, в которых атомы кислорода расположены так, что образуют правильные шестиугольники, как это видно на рисунке (стр. 409, *вверху*). Наверное, с этим и связана чаще всего встречающаяся шестилучевая форма изящных звездочек-снежинок. Изумительная красота и бесконечное разнообразие форм снежинок, их поразительная симметрия вдохновили многих ученых на исследования этой удивительной загадки природы. Были получены десятки тысяч фотографий снежинок в самых разнообразных условиях: и высоко в облаках, и у земли, и на крайнем севере, и на юге — всюду, где только может идти снег. Кроме огромного множества самых разнообразных форм гексагональной симметрии, встречаются и пластиночки, и столбики, и игольчатые формы. Сотни различных типов снежинок обнаружили ученые. Но если быть очень точными, то придется признать, что совершенно одинаковых снежинок не существует. В бесконечном многообразии каждая хоть чем-нибудь да отличается по форме и размеру.

Нет сомнения, что это зависит от бесконечной изменчивости условий образования и роста снежинок в атмосфере. С нежной красотой снежинки связано еще много неразгаданного в природе.

Сколько тепла нужно, чтобы нагреть воду?

Очень много. Больше, чем для нагревания равного количества любого другого вещества. Чтобы нагреть грамм воды на один градус, необходима одна калория, или 4,19 Дж. Это больше чем вдвое превышает теплоемкость любого химического соединения.

Вода — вещество, необычайное даже в самых обыденных для нас свойствах. Конечно, эта особенность воды имеет очень большое значение не только при варке обеда на кухне. Вода — это великий распределитель тепла на Земле. Нагретая Солнцем под экватором, она переносит тепло в Мировом океане гигантскими потоками морских течений в далекие полярные области, где жизнь возможна только благодаря этой удивительной особенности воды.

Как вода попадает в облака?

Очень просто. Солнце нагревает воду. Всюду, где она есть,— в луже, в пруду, в море, в океане. Вода поглощает в своем тонком верхнем слое почти всю энергию попадающих на нее солнечных лучей и испаряется. Молекулы воды исключительно просты в своем строении и вместе с тем необычайны, отличны от всех других молекул. Они сильно притягиваются друг к другу благодаря силам межмолекулярного притяжения за счет дополнительных водородных связей. Солнцу приходится затрачивать очень много энергии, чтобы разделить молекулы воды, чтобы превратить ее в пар. Нет ни одного вещества, у которого бы удельная теплота испарения была бы больше, чем у воды. Вода — лучший теплоноситель. Ничто не может сравниться с ней. Ничто не может лучше работать в паровых турбинах электростанций, в цилиндрах паровых двигателей.

Вода — гигантский двигатель и в природе. Метеорологи подсчитали, что Солнце испаряет на Земле за одну минуту *миллиард* тонн воды. Каждую минуту миллиард тонн водяного пара вместе с восходящими потоками нагретого воздуха поднимается в верхние слои атмосферы. Каждый грамм водяного пара уносит с собой 537 калорий солнечной энергии.

На большой высоте, где давление мало́, воздух расширяется, его температура сильно понижается и водяной пар конденсируется, снова превращаясь в воду — ее мельчайшие капельки образуют облака.

Ответ (загадку найдите сами)

Этот изящный венец не корона средневекового владыки, как может показаться на первый взгляд. Все гораздо проще... и интереснее. Фотографу удалось запечатлеть процесс падения капли молока на поверхность жидкости (тоже молока). Что же происходит? Стенки углубления в жидкости, возникшего при прохождении сквозь ее поверхность капли, сначала спадаются. Энергия жидкости кумулируется (накапливается) в центре. Из середины буквально выстреливает жидкая струя. Ее уже не видно на снимке. От нее осталась только высоко поднявшаяся вверх крупная капля. Снова опустившаяся вниз жидкость, обладающая большой энергией, выбрасывается по краям в виде конуса из тонкой жидкой пленки, распадающейся затем на тонкие струйки. Каждая из струек, в свою очередь, распадается на капли. Их на снимке видно очень хорошо. Не следует думать, что это просто интересные пустяки, не имеющие значения. В природе имеет значение все. Такого рода процессы, как этот, привели к созданию кумулятивных снарядов, пробивающих самую прочную броню.

Энергия Солнца, поднятая с водяным паром вверх, неминуемо должна выделиться обратно, когда он превращается в облака. Эта энергия переходит в тепловую, нагревая воздух. Каждую минуту водяной пар отдает атмосфере Земли чудовищно огромное количество энергии: $2{,}2 \cdot 10^{18}$ Дж. Столько энергии за то же время могли бы выработать сорок миллионов электростанций, по миллиону киловатт каждая.

Это та энергия, которая переносит сотни миллиардов тонн воды по воздуху в облаках и орошает дождями всю поверхность Земли. Это та энергия, за счет которой дуют ветры, возникают бури, рождаются ураганы и штормы. А только один развившийся ураган выделяет энергию, эквивалентную энергии 30 тыс. атомных бомб.

Почему в море вода соленая?

Это, пожалуй, одно из самых важных следствий одного из самых удивительных свойств воды. В ее молекуле центры положительных и отрицательных зарядов сильно смещены относительно друг друга. Поэтому вода обладает исключительно высоким, аномальным значением диэлектрической проницаемости. Для воды $\varepsilon = 80$, а для воздуха и вакуума $\varepsilon = 1$. Это значит, что два любых разноименных заряда в воде взаимно притягиваются друг к другу с силой в 80 раз меньшей, чем в воздухе. Ведь по закону Кулона

$$f = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\varepsilon \cdot r^2}.$$

Но все межмолекулярные связи во всех телах, определяющие прочность тела, обусловлены взаимодействием между положительными зарядами атомных ядер и отрицательными электронами. На поверхности тела, погруженного в воду, силы, действующие между молекулами или атомами, ослабевают под влиянием воды почти в сотню раз. Если оставшаяся прочность связи между молекулами становится недостаточной, чтобы противостоять действию теплового движения, молекулы или атомы тела отрываются от его поверхности и переходят в воду. Тело начинает растворяться, распадаясь либо на отдельные молекулы, как сахар в стакане чаю, либо на заряженные частицы — ионы, как поваренная соль.

Именно благодаря аномально высокой диэлектрической проницаемости вода — один из сильнейших растворителей. Она способна растворить любую горную породу на земной поверхности. Медленно и неотвратимо она разрушает даже граниты, выщелачивая из них наиболее легко растворимые составные части. Нет в природе такой прочной породы, которая могла бы сопротивляться всемогущему разрушителю — воде.

Ручьи, речки и реки сносят растворенные водой примеси в океан. Вода океана испаряется и вновь возвращается на Землю, чтобы снова и снова продолжать свою вечную работу. А растворенные соли остаются в морях и океанах.

Не думайте, что вода растворяет и сносит в море только то, что легко растворимо, и что в морской воде содержится только обычная соль, которая стоит на обеденном столе. Нет, морская вода содержит в себе почти все элементы, существующие в природе. В ней есть и магний, и кальций, и сера, и бром, и иод, и фтор. В меньшем количестве в ней найдены железо, медь, никель, олово, уран, кобальт, даже серебро и золото. Свыше 60 элементов нашли химики в морской воде. Наверное, будут найдены и все остальные. Больше всего в морской воде поваренной соли. Поэтому вода в море соленая.

А знаете ли вы, что кровь человека и животных близка по составу к морской воде? И что растения извлекают из земли питательные вещества в виде водного раствора? Если бы вода не обладала удивительным свойством — необычайно высокой диэлектрической проницаемостью, море не было бы соленым. Но это некому было бы заметить — не было бы на Земле жизни.

Распадаются ли в воде на ионы ее собственные молекулы?

Да, распадаются. Молекулы воды очень прочны, но все же очень небольшая часть их диссоциирует на ионы: $H_2O = H^+ + OH^-$. При этом из каждого миллиарда молекул воды при обычной температуре диссоциированы всего лишь только 2 молекулы.

Свободный протон H^+ — ядро атома водорода,— конечно, не может существовать в водной среде: ион водорода немедленно присоединяется к молекуле воды и образует ион гидроксония H_3O^+.

А может ли быть вода без молекул воды?

Да, как будто бы может. Правда, такая вода еще пока не получена. Но ученые установили, что если воду нагревать все выше и выше, то диссоциация ее молекул на ионы будет все более возрастать.

При очень высокой температуре должно наступить такое удивительное состояние воды, при котором в ней не останется ни одной молекулы воды, все они распадутся на ионы. Удалось рассчитать, что такое странное состояние воды должно наступить при температуре не ниже 900° С. Давление при этом должно быть не менее 15 ГПа (150 000 атмосфер). Может быть, такая вода существует в недрах Земли. Интересно, какие у нее свойства?

Как вода образуется в воде из воды?

Конечно, проще всего предположить, что молекулы воды в воде образуются при взаимодействии про-

В условиях невесомости вода принимает форму шара.

Поверхностное натяжение воды столь велико, что по ней спокойно могут гулять довольно крупные водяные насекомые, вроде этих.

тона — иона водорода с отрицательным ионом — гидроксилом. Так это и было написано во всех школьных учебниках мира. Потом химики стали считать, что молекулы воды образуются при взаимодействии гидроксила с ионом гидроксония:

$$H_3O^+ + OH^- = 2H_2O.$$

Так как размеры иона гидроксония гораздо больше размеров «голого» протона — иона водорода H^+, то столкновения гидроксила с гидроксонием должны происходить чаще, чем с протоном, и скорость реакции должна быть выше. Можно даже теоретически рассчитать, определив размеры частиц, значение констант скоростей обеих реакций — и с протоном и с ионом гидроксония.

Однако опыт привел к неожиданному и удивительному результату: оказалось, что константа скорости реакции на самом деле имеет еще большее значение и молекулы воды в воде образуются и не из ионов водорода H^+, как учили школьные учебники, и не из ионов гидроксония, как считают почти все химики, а из частиц гораздо больших размеров. Ученые думают теперь, что вода в воде образуется из больших ионов $H_9O_4^+$ и $H_7O_4^-$.

Уравнение реакций образования воды в воде выглядит даже для глаза химика на самом деле совершенно удивительно:

$$H_9O_4^+ + H_7O_4^- = 8H_2O$$

Почему вода «мокрая»!

Вода не очень «мокрая», если считать, что этот шутливый вопрос относится к способности воды смачивать другие тела. Большинство жидкостей гораздо «мокрее» воды. Вода с трудом смачивает металлы, совершенно не смачивает жирные поверхности. Водой не намочишь парафин. Капли воды скатываются с поверхности многих полимерных материалов: тефлона, полиэтилена и др. Спирт же, например, или керосин очень хорошо смачивают почти любые тела. Это объясняется тем, что силы взаимодействия между молекулами воды так велики, что вода собирается в капли там, где другие жидкости растекаются.

Это свойство воды причиняет много огорчений в обыденной жизни и в технике: загрязненные жиром или маслами руки водой не отмоешь. Из-за этого и было изобретено мыло. Химиками было синтезировано много специальных веществ — «смачивателей», чтобы воду сделать «мокрее».

А «сухой» вода может быть!

Оказывается, может. Недавно ученые сумели приготовить «сухую» воду. Для этого нужно к обычной воде добавить совсем немного тонко размельченного порошка несмачиваемой кремниевой кислоты. Вода сразу становится сухой и сыпучей. Ее можно пересыпать, перевозить в пакетах; даже на ощупь такая вода совсем не влажная, а сухая и холодная.

Какую форму имеет вода!

Хотя этот вопрос может показаться странным, но он задан совершенно правильно. Вода обладает собственной формой, как и любая другая жидкость. Ее форма — шар. Утверждение учебников, что вода принимает форму сосуда, а собственной не имеет, неверно. Ее собственная форма на Земле обычно искажена земным притяжением.

Но что воде свойственна форма шара, в этом очень легко убедиться — достаточно слетать на космическом корабле в космос и вытряхнуть там воду из бутылки. Можно увидеть это и на Земле: посмотрите на падающую каплю или выдуйте хороший мыльный пузырь. В этих случаях действие веса исключено и вода принимает собственную форму.

Можно ли бегать по поверхности воды!

Можно. Чтобы в этом убедиться, посмотрите летом на поверхность любого пруда или озера. По воде не только ходит, но и бегает немало живого и быстрого народца. Если учесть, что площадь опоры лапок у этих насекомых очень мала, то нетрудно понять, что, несмотря на их небольшую массу, а следовательно, и небольшой вес, поверхность воды выдерживает, не прорываясь, значительное давление.

Может ли вода течь вверх!

Да, может. Это происходит всегда и повсеместно. Сама поднимается вода вверх в почве, смачивая

всю толщу земли от уровня грунтовых вод. Сама поднимается вода вверх по капиллярным сосудам дерева и помогает растению доставлять растворенные питательные вещества на большую высоту — от глубоко скрытых в земле корней к листьям и плодам. Сама движется вода вверх в порах промокательной бумаги, когда вам приходится высушивать кляксу, или в ткани полотенца, когда вытираете лицо. В очень тонких трубочках — капиллярах — вода может подняться на высоту до нескольких метров.

Чем это объясняется?

Еще одной замечательной способностью воды — ее исключительно большим поверхностным натяжением. Молекулы воды на ее поверхности испытывают действие сил межмолекулярного натяжения только с одной стороны, а у воды это взаимодействие аномально велико. Поэтому каждая молекула на ее поверхности втягивается внутрь жидкости. В результате возникает линейная сила, стягивающая поверхность жидкости. У воды она особенно велика: ее поверхностное натяжение составляет 73 мН/м (миллиньютона на метр).

Эта сила и придает мыльному пузырю, падающей капле и любому количеству жидкости в условиях невесомости форму шара. Она поддерживает бегающих по поверхности пруда жуков, лапки которых водой не смачиваются. Она поднимает воду в почве, стенки тонких пор и отверстий в ней, наоборот, хорошо смачиваются водой. Вряд ли вообще было возможно земледелие, если бы вода не обладала этой исключительной особенностью.

А может ли вода гореть?

Может. Вода неплохо горит в атмосфере свободного фтора.

Видел ли хоть кто-нибудь воду?

Этот вопрос может показаться нелепым. Однако если быть строгим и точным в ответах, то придется сказать, что нет — воду пока еще, наверное, никто не видел и не держал в руках. То, что налито в стакане и что мы по привычке называем водой, на самом деле всегда представляет собой *раствор* очень многих веществ в воде. В ней растворены газы: азот, кислород, аргон, углекислота — и все примеси, находящиеся в воздухе. В ней растворены, наверное, сотни, а может быть, и тысячи различных соединений почти всех элементов периодической системы. В ней взвешены мельчайшие нерастворимые частицы пыли. Это мы и называем чистой водой.

Много ученых работает над решением трудной проблемы получения абсолютно чистой воды. Но пока еще получить такую воду не удалось. Да и как это сделать: налитая в стакан вода растворяет стенки стакана, соприкасаясь с любым газом, она растворяет газ.

Очень тщательно очищенная и освобожденная от газов вода приобретает совершенно необычайные свойства: ее можно перегреть на десятки градусов выше точки кипения — она не закипит, ее можно очень сильно переохладить — она не замерзнет.

Все ли свойства воды понятны ученым?

Конечно, нет! Вода — загадочное вещество. До сих пор ученые не могут еще понять и объяснить очень многие ее свойства. Непонятно, например, почему вода не только изменяет некоторые свойства при воздействии на нее магнитного поля, но и надолго сохраняет эти изменения. В такой воде иначе идут реакции осаждения. Многие соли из обычной воды выпадают при ее испарении в форме плотного осадка, образуя накипь (посмотрите в чайник). «Намагниченная вода» накипи не образует. Почему это так — никто не знает. Но то, что явление это еще не понято и пока не объяснено, нисколько не мешает инженерам с успехом применять его в технике для борьбы с накипью в паровых котлах тепловых электростанций.

Недавно было обнаружено новое загадочное явление. Оказалось, что вода на Земле изменяет свою природу в зависимости от того, что происходит на Солнце и в космосе. Было замечено, что космические причины влияют на характер протекания в воде некоторых химических процессов, например на скорость появления осадков. Почему — неизвестно.

Многие наблюдения и факты говорят о том, что талая вода обладает особыми свойствами — она более благоприятна для развития живых организмов. Почему — тоже неизвестно.

Можно не сомневаться, что все подобные загадки будут успешно разрешены наукой. Будет открыто еще немало новых, более удивительных загадочных свойств воды — самого необыкновенного вещества в мире.

Все ли свойства воды уже перечислены в этой статье?

Нет, к сожалению, далеко не все. Не хватило места даже для наиболее интересных. Но тот, кто захочет подробно познакомиться со *всеми* свойствами воды, которые уже изучены, сможет это сделать самостоятельно.

Для этого ему нужно будет прочесть во всех научных библиотеках мира все вышедшие журналы и книги, где напечатаны научные работы по химии, физике, биологии, физиологии, биохимии, биофизике, геологии, геохимии. Придется изучить и многие

работы по астрономии и астрофизике. (Интересно, есть ли вода на планетах, в межзвездном пространстве, в далеких галактиках? И как ее там ищут астрономы?) Надо будет изучить работы по зоологии и ботанике (ни животные, ни растения без воды жить не могут). Рыбы и микроорганизмы живут в воде — придется читать работы по ихтиологии и микробиологии.

Само собой разумеется, что нельзя пропустить книги по гидрологии, океанологии, лимнологии (это очень интересная наука об озерах), необходимо также изучить работы ученых по теории рек, их образованию и жизни, тщательно проработать все, что известно по гляциологии (это очень важная наука о свойствах льда — она помогает строить большие города на далеком Севере), по спелеологии (ведь пещеры в недрах Земли созданы водой, и это тоже ее свойство).

Без термодинамики нельзя понять роль воды в энергетике (ведь большинство тепловых электростанций работают на водяном паре, а гидростанции — на воде). Придется изучить и ядерную физику (зачем атомной энергетике нужна тяжелая вода). Есть еще очень трудная наука — гидравлика.

Придется изучить ряд разделов электротехники — без этой науки нельзя усвоить электрохимию, большинство процессов которой протекает в водных растворах.

Где и какие реки, моря и океаны расположены на Земле, рассказано в работах по географии. Совершенно особые свойства воды изучает навигация — наука о кораблевождении и теория кораблестроения.

Очень много интересного о воде можно узнать из книг по метеорологии — науке, которая изучает, почему рождаются тучи и идет из них дождь.

Нельзя оставить без внимания научные работы по медицине — и в человеке все жизненные процессы протекают в водной среде.

Может быть, вы думаете, что можно пропустить сочинения по истории, по экономике? Нет, их развитие определилось на нашей планете водными путями сообщения.

Наверное, можно назвать, если хорошенько подумать, еще много других отраслей знаний, в которых изучаются свойства воды. Попробуйте подумать сами.

Все ли уже известно о воде!

Совсем еще недавно, немного лет назад, химики были уверены, что состав воды им хорошо известен. Но однажды одному из них пришлось измерить плотность остатка воды после электролиза. Он был удивлен: плотность оказалась на несколько стотысячных долей выше нормальной. В науке нет ничего незначительного. Эта ничтожная разница потребовала объяснения. В результате ученые открыли много новых больших тайн природы. Они узнали, что вода очень сложна. Были найдены новые изотопные формы воды. Добыта из обычной тяжелая вода; оказалось, что она совершенно необходима для энергетики будущего. Теперь во всех странах мира физики упорно и неустанно работают над решением этой великой задачи. А началось все с простого измерения самой обычной, будничной и неинтересной величины — плотность воды измерена точнее на лишний десятичный знак.

Каждое новое, более точное измерение, каждый новый верный расчет, новое наблюдение не только повышают уверенность в знании и надежности уже добытого и известного, но и раздвигают границы неведомого и еще не познанного, прокладывают к ним новые пути.

Нет предела человеческому разуму, нет предела его возможности; и то, что мы теперь так много знаем о природе и свойствах *воды* — поистине самого удивительного в мире вещества,— открывает перед нами, перед теми, кто читает сейчас эту книгу, еще большие, неограниченные возможности. И кто может сказать, что вы еще узнаете, что откроете нового, еще более необычайного. Умейте только видеть и удивляться.

Вода, как и все в мире, неисчерпаема.

Химическая реакция

Нам известно ныне 105 химических элементов периодической системы Менделеева. Подавляющее большинство из них получено в свободном виде. А между тем в природе химические элементы встречаются главным образом в форме самых разнообразных соединений. Извлечь тот или иной элемент из минерала или горной породы часто нелегко, и сделать это удается с помощью целого комплекса химических процессов. Эти процессы и есть химические реакции.

Самая простая молекула — H_2 и одна из самых сложных — молекула ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты).

Количество известных химических соединений — от простейших до самых сложных — превышает 2 млн. Все они, а также и те, с которыми еще предстоит встретиться исследователям,— результат химического взаимодействия элементов, продукт химических реакций. Ежесекундно во Вселенной происходит бесчисленное множество химических реакций.

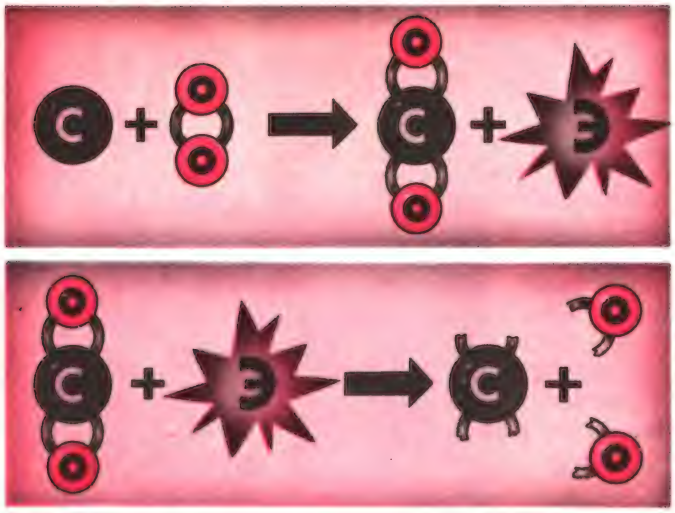
...Вы пробегаете глазами эти строки, улавливаете их смысл, и в вашем мозгу совершаются сотни и тысячи различных химических реакций. Если в стакан крепкого чая положить кусочек лимона, цвет напитка бледнеет: произошла химическая реакция. Топится печь, пляшут яркие огоньки пламени, и от смолистых поленьев остается кучка золы. Это превращение осуществилось благодаря химическим реакциям. Реакция горения — первая химическая реакция, с которой познакомился человек. А потому легенду о Прометее, подарившем людям огонь, можно считать легендой о том, как человек впервые столкнулся с химическими взаимодействиями.

...Весь облик нашей Земли, ее леса и горы, ее почвы и воды созданы химическими превращениями. Уголь, который дает нам электричество; нефть — топливо, приводящее в движение автомобили и самолеты; металлы, выплавленные из руд,— все это продукты химических реакций.

В своем понимании химической реакции человек прошел длинный путь. Дикарь, который с удивлением наблюдал, как молния превращает могучее дерево в уголь и золу, и современные исследователи, которые сумели синтезировать белок, одно из самых сложных веществ,— вот две крайности представлений человека о химических реакциях.

Когда простые или сложные вещества вступают во взаимодействие друг с другом, то мы обычно можем это наблюдать. Стоит бросить в раствор серной кислоты кусочек цинка, как моментально от него побегут пузырьки газа. Пройдет некоторое время, и металл исчезнет. Цинк растворился в кислоте, и выделился водород. Как все это происходило, вы видели своими глазами. Если поджечь комок серы, он загорится голубоватым пламенем, появится удушливый запах. Сера соединилась с кислородом и образовала химическое соединение — сернистый ангидрид. Польем белый порошок безводной сернокислой меди $CuSO_4$ водой, он синеет. Соль соединилась с водой, и образовалось соединение — синие кристаллы медного купороса — $CuSO_4 \cdot 7H_2O$. Вещества такого вида называются *кристаллогидратами*.

Всем знаком процесс гашения извести. Негашеную известь CaO обливают водой, получается «гашенка» $Ca(OH)_2$. Цвет вещества не изменился, но



В ходе химической реакции образуется новое соединение (вещество), происходит выделение или поглощение энергии (*Э*).

легко убедиться, что реакция прошла. При гашении извести выделяется много тепла.

Химические реакции проходят с выделением или поглощением энергии, чаще всего теплоты. Вот первое непременное условие всех химических реакций. Иногда тепла выделяется так много, что это легко обнаружить на ощупь. Реакции, идущие с выделением тепла, называют *экзотермическими*.

Гашение извести — это пример экзотермической реакции:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Э.$$

Э равна 16 ккал.

Известно множество экзотермических реакций, где тепла выделяется несравненно больше, например горение бора в кислороде:

$$4B + 3O_2 \rightarrow 2B_2O_3 + 672 \text{ ккал}.$$

Образование озона — хороший пример *эндотермической* реакции, идущей с поглощением тепла:

$$3O_2 + 69 \text{ ккал} \rightarrow 2O_3.$$

Соединения, которые образуются с выделением энергии, называются *экзотермичными*. Их гораздо больше, чем соединений *эндотермичных*, образующихся с поглощением энергии. Все эндотермичные соединения мало устойчивы.

Царство химических реакций — это сложнейшая область, и изучают ее самые различные науки. Чтобы понять, как происходит та или иная реакция, химик призывает на помощь и физику, и математику, и биологию. Он часто нуждается в услугах хитроумных вычислительных машин.

Разные химические процессы протекают с различной скоростью. Одни совершаются мгновенно, другие так медленно, что на первый взгляд кажется, будто реакция не идет совсем. Таких «незаметных» реакций очень много, и среди них есть очень важные, жизненно необходимые для практики, для получения нужных человеку веществ.

Взрыв — вот пример мгновенной реакции. Здесь счет идет на доли секунды. Твердое взрывчатое вещество превращается в газообразные продукты.

Процесс ржавления, или коррозии, железа наносит громадные убытки человечеству. Около 12% производимого металла теряется бесполезно. Коррозия — пример коварного процесса — протекает постепенно. Вечером железная пластинка будет такой же, как утром, но пройдет несколько дней, и на ее поверхности появятся рыжеватые разводы ржавчины. Процесс коррозии во многом зависит от окружающих условий. В тропических странах, где высокая влажность и жарко, стальные и железные изделия ржавеют быстрее, чем в средних широтах. Обратите внимание, что повышенная температура ускоряет коррозию.

А вот, допустим, в стеклянном сосуде смешаны два газа — водород и кислород, составные части воды. Сосуд при комнатной температуре (15—20° С) может стоять сколько угодно, и на поверхности стекла не будет заметно ни единой капельки влаги. Кажется, что водород вовсе и не соединяется с кислородом. Соединение идет, но только чрезвычайно медленно. Чтобы на донышке сосуда образовалась лужица воды, должны пройти тысячелетия. В чем же дело? Оказывается, комнатная температура слишком низка, чтобы водород и кислород вступили в быстрое взаимодействие. Но если нагревать сосуд, стенки его запотевают. Это верный признак протекающей реакции. А при 500° С сосуд разлетится на мелкие осколки. При такой температуре образующие воду газы реагируют со взрывом.

Но всегда ли это происходит так? Нет, не всегда. Чтобы образовался один объем водяного пара, нужно взять два объема водорода и один объем кислорода. Эту смесь называют также гремучим газом: при нагревании она взрывается. Если же объемное содержание водорода в смеси менее 4% или более 94%, то такая смесь не взрывоопасна. Скорость химической реакции зависит не только от температуры, но и от концентрации реагирующих продуктов.

Температура и концентрация — вот те важнейшие понятия, которыми оперирует химическая *кинетика* — наука о скоростях химических реакций. Ее основной девиз: обеспечить полноту протекания химического процесса, получить наибольший выход нужного продукта. Ради этого химик-кинетик становится и физиком и математиком. Он ставит перед собой задачу рассчитать химическую реакцию.

Итак, прежде чем смешивать исходные вещества, химик задается вопросом: при какой температуре пойдет реакция? При обычной, комнатной, начинаются немногие. Смесь порошков магния и серы так и остается смесью. Но стоит подвести к ним пламя — реакции начинаются тут же.

Почему же тепло способно заводить механизм химического процесса? Вернемся снова к воде. Водород и кислород в свободном виде существуют в форме молекул H_2 и O_2. Чтобы эти молекулы могли прореагировать, они должны столкнуться. И чем чаще будут такие столкновения, тем вероятнее образование молекулы воды. При комнатной температуре и нормальном давлении каждая молекула водорода должна сталкиваться с молекулой кислорода... более десяти миллиардов раз в секунду. Если бы любое столкновение приводило к химическому взаимодействию, реакция прошла бы быстрее взрыва — за одну десятимиллиардную долю секунды! Но мы не видим в сосуде, где смешаны два объема водорода с одним объемом кислорода, никаких изменений потому, что в обычных условиях очень редкое столкновение приводит к химической реакции. И секрет заключается в том, что сталкиваются молекулы водорода и кислорода.

Прежде чем вступить в реакцию, молекулы должны распасться на атомы. Точнее говоря, химические связи между атомами кислорода и атомами водорода в их молекулах должны ослабнуть, и настолько, чтобы не препятствовать объединению разнородных атомов водорода и кислорода. Температура играет роль кнута, подстегивающего реакцию. Она во много раз увеличивает число столкновений, делает соударения молекул более энергичными. Это приводит к ослаблению химических связей в молекулах H_2 и O_2. А когда свободные атомы водорода и кислорода получают возможность встретиться, они реагируют мгновенно.

Но химика-кинетика такое качественное описание процесса мало удовлетворяет. И он вводит новое понятие — *энергия активации*. Это та самая энергия, которой должны обладать молекулы, чтобы приобрести способность к химическому взаимодействию.

Даже при обычной температуре среди молекул водорода и кислорода отыщутся такие, у которых энергия равна или больше энергии активации. Потому-то образование воды идет, но чрезвычайно медленно. Слишком мало достаточно энергичных молекул. А высокая температура приводит к тому, что активационного барьера достигают многие молекулы.

Роль энергии активации поистине колоссальна. Вообразим себе, что все молекулы стали бы реагировать друг с другом при любых энергиях. Тогда не стоило бы даже говорить о скоростях реакции. Все вещества стали бы очень быстро соединяться друг с другом, и образовывались бы самые устойчивые соединения: окислы, соли. Все металлы моментально бы окислились, все сложные органические вещества разрушились, превратились бы в простые, но более устойчивые соединения, в том числе и вещества, входящие в состав живых клеток. Получился бы странный мир — мир без жизни, без химии, фантастический мир очень устойчивых соединений, не имеющих желания вступать в химические взаимодействия. Вот от таких неслыханных бед оберегает нас существование энергии активации.

Посмотрим теперь, что такое концентрация и какую роль играет она в химических реакциях. *Концентрацией* называют число молекул реагирующего

Роберт Бойль (1627—1691)

Английский химик и физик. Бойль усовершенствовал воздушный насос, установил обратную зависимость изменения объема воздуха от давления (закон Бойля — Мариотта), изучал световые явления, теплоту и электричество, пытаясь свести их к механическим явлениям. В главном труде по химии — «Химик-скептик» — дал первое научное определение химического элемента как предела разложения вещества на составные части. Этим он впервые поставил химию на научную основу. Бойль разработал качественный химический анализ, пытался развить теоретические взгляды на предмет и задачи химии. Работы Бойля дали основание Ф. Энгельсу сказать: «Бойль делает из химии науку».

вещества в единице объема, например в кубическом сантиметре. Чем выше концентрация молекул взаимодействующих веществ, тем чаще они будут сталкиваться, тем быстрее пойдет реакция. Как же повысить концентрацию? Как «зажать» в кубический сантиметр объема побольше молекул?

Вот пример. Синтез аммиака в практической деятельности человека — очень важный химический процесс. Три молекулы водорода и одна молекула азота дают две молекулы аммиака:

$$3H_2 + N_2 \longrightarrow 2NH_3.$$

Если при обычном давлении смешать три объема водорода и один объем азота, то будет всего лишь смесь газов. Но вот давление увеличивается, скажем, в 500 раз. Смесь подвергается давлению, равному 50 МПа (мегапаскалям). Скорость реакции увеличивается в 60 с лишним миллиардов раз.

Химикам известна важная закономерность: скорость химической реакции пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ. Эта закономерность называется *законом действующих масс* (ЗДМ). Установили ее норвежские ученые К. М. Гульдберг и П. Вааге.

Вот как ЗДМ записывается в математической форме:

$$v = k\,[A]\cdot[B].$$

В этом выражении v — скорость реакции, [A] и [B] — концентрации реагирующих веществ, а k — постоянная для данной реакции величина, называемая *константой скорости реакции*. Величина k численно равна скорости реакции, если $[A]\cdot[B] = 1$.

Написанное выше уравнение для v предполагает, что в каждом акте реакции участвует по одной молекуле веществ A и B. В общем же случае, когда, например, m молекул вещества A реагируют с n молекулами вещества B, уравнение ЗДМ принимает вид:

$$v = k\,[A]^m\cdot[B]^n.$$

Вспомним теперь основной девиз кинетики: обеспечить полноту протекания химической реакции, получить наибольший выход нужного продукта. Ведь задача химии — служить человеку, служить с толком. В прошлом у химии существовал свой символ: змея, кусающая собственный хвост. Если этот образ перенести на более понятный язык современной науки, то он означает: обратимая химическая реакция. Все химические реакции в принципе обратимы. Два атома водорода и атом кислорода, соединяясь, дают молекулу воды, и одновременно другая молекула воды распадается на составные части. Две противоположные реакции протекают одновременно: образование воды (прямая реакция) и ее распад (обратная реакция). Если скорость прямой реакции равна скорости обратной, то данная система находится в равновесии. И так для любой реакции. В различных реакциях равновесие достигается в разное время: у одних мгновенно, а у других далеко не сразу.

Чтобы девиз кинетики осуществился практически, нужно одно: как можно дольше оттянуть момент

Антуан Лоран Лавуазье (1743—1794)

Французский химик, член Парижской академии наук. Продолжил начатое Ломоносовым преобразование химии в науку, основанную на точных измерениях. Руководствуясь законом сохранения массы, он правильно объяснил окисление металлов и горение других веществ как реакции соединения их с кислородом; определил состав воды и затем синтезировал ее, чем окончательно опроверг гипотезу флогистона. Под руководством Лавуазье была разработана первая рациональная номенклатура химических соединений, принципы которой сохранились до наших дней. Он был одним из основателей термохимии, ввел химические методы исследования в физиологию, на опыте показал, что дыхание есть медленное окисление.

С ростом давления увеличивается концентрация (число молекул реагирующих веществ в единице объема) и число столкновений реагирующих молекул. Поэтому давление увеличивает скорость реакции, которая пропорциональна числу столкновений.

наступления равновесия, не допустить, чтобы обратная реакция стала конкурировать с прямой. Здесь приходится ввести еще одно очень важное для мира химических взаимодействий понятие: *константа равновесия* — важнейший рычаг для управления химическими реакциями.

Константа равновесия реакции — это отношение произведения концентраций образовавшихся веществ к произведению концентраций веществ, первоначально вступивших в реакцию. Вот выражение для константы равновесия процесса синтеза аммиака:

$$K = \frac{[NH_3]^2}{[H_2]^3 \cdot [N_2]}.$$

В числителе — концентрация образовавшегося аммиака NH_3; так как его две молекулы, то концентрация возведена в квадрат: $[NH_3] \cdot [NH_3] = [NH_3]^2$. Как «построен» знаменатель, легко догадаться.

Химик называет химическим равновесием такое состояние системы реагирующих веществ, при котором скорости прямой и обратной реакций равны. Это условие равновесия можно записать на языке математики.

Вот обратимая реакция:

$$A + B \rightleftarrows C + D.$$

Используя закон действующих масс, получим выражения для скоростей прямой (v_1) и обратной (v_2) реакций:

$$v_1 = k_1 \cdot [A] \cdot [B]$$

и

$$v_2 = k_2 \cdot [C] \cdot [D].$$

При наступлении химического равновесия $v_1 = v_2$, и следовательно:

$$k_1 [A] \cdot [B] = k_2 [C] \cdot [D].$$

Это равенство мы перепишем так:

$$\frac{[C] \cdot [D]}{[A] \cdot [B]} = \frac{k_1}{k_2}.$$

Мы знаем, что k_1 и k_2 — константы скоростей прямой и обратной реакций — величины постоянные. Поэтому их отношение — тоже постоянная величина:

$$\frac{k_1}{k_2} = K.$$

Но величина K есть не что иное, как константа равновесия. Нетрудно найти и физический смысл K. Константа равновесия показывает, во сколько раз прямая реакция идет быстрее обратной при одинаковой температуре и произведениях концентраций, равных единице.

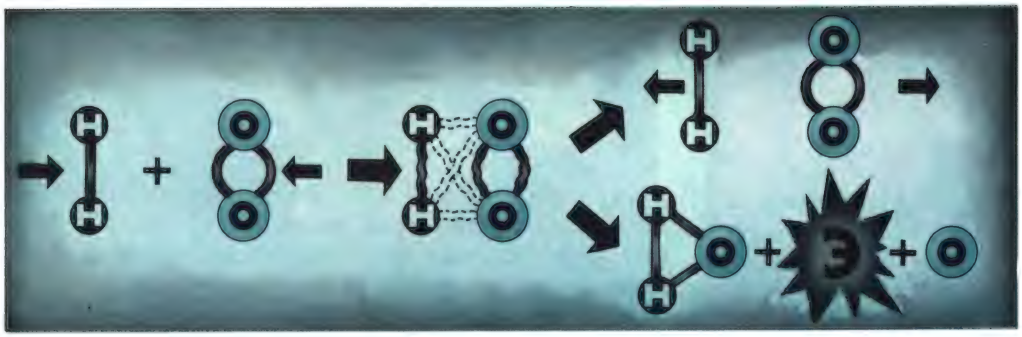
Если химик хочет, чтобы та или иная химическая реакция имела практический «резонанс», он должен предварительно выяснить, чему равны значения ее константы равновесия при различных температурах. Всякая дробь тем больше, чем больше ее числитель и чем меньше знаменатель. Чем больше будет концентрация образующихся продуктов реакции, тем меньше становится концентрация исходных. Тем большим оказывается значение K. Следовательно, тем в более сильной степени прямая реакция преобладает над обратной. Вот к чему в итоге сводится задача химика — к регулировке константы равновесия. А эта регулировка требует знания двух других важнейших понятий кинетики: фактора температуры и фактора давления.

Для иллюстрации главных принципов химического взаимодействия вернемся опять к синтезу аммиака. При комнатной температуре K для синтеза аммиака равна примерно 100 млн. Казалось бы, смесь азота и водорода в таких условиях моментально должна превратиться в аммиак. Но она не превращается. Очень уж мала скорость прямой реакции. А если смесь нагреть до 500° С? Однако в таких условиях у нас ровным счетом ничего не получится...

Расчеты кинетики показывают, что при температуре 500° С K составляет всего-навсего... шесть тысячных ($6 \cdot 10^{-3}$). Во много раз преобладает обратная реакция: $2NH_3 \longrightarrow 3H_2 + N_2$. А мы бы нагревали и нагревали смесь и думали, почему у нас ничего не получается.

Химическая кинетика четко доказала: для синтеза аммиака наиболее выгодны возможно низкая температура и возможно высокое давление. И помог кинетике в этом еще один закон, управляющий миром химических реакций, так называемый *принцип Ле Шателье*, названный в честь открывшего его французского ученого.

Представим себе пружину, вделанную в неподвижную опору. Если оставить пружину в покое, можно сказать, что она находится в равновесии. Если сжимать ее или, наоборот, растягивать, пру-



Химическая реакция между молекулами исходных веществ происходит только в том случае, если кинетическая энергия столкнувшихся молекул достаточна для образования промежуточного соединения и разрыва старых связей молекул.

жина из состояния равновесия выходит. Однако одновременно начинает увеличиваться ее упругость, т. е. силы, стремящиеся вернуть ее к равновесию. Они-то и противодействуют сжатию или растяжению пружины. Наконец, наступит момент, когда обе силы уравновешиваются. Пружина снова оказывается в равновесном состоянии. Но это будет уже иное, не начальное равновесие. Оно будет смещено в сторону сжатия или растяжения.

Такое поведение деформируемой пружины аналогично действию принципа Ле Шателье. Вот как его формулирует кинетика. Пусть внешняя сила действует на систему, находящуюся в равновесии. Тогда равновесие смещается в сторону, указываемую этим воздействием. Смещается до тех пор, пока силы противодействия не уравняются с внешними. Опять призовем на помощь реакцию синтеза аммиака. Она, как известно, обратимая: $3H_2 + N_2 \rightleftarrows 2NH_3$.

Из четырех объемов газов получаются два. Увеличивается давление, и это приводит к уменьшению объема. Следовательно, реакция смещается вправо. «Пружина» сжимается. Выход аммиака увеличивается. Но любая реакция сопровождается выделением или поглощением тепла. При синтезе аммиака тепло выделяется:

$$3H_2 + N_2 \longrightarrow 2NH_3 + Э.$$

Если нагревать смесь, то реакция пойдет справа налево. Обратная реакция будет преобладать над прямой. «Пружина» растягивается. В обоих случаях установится новое равновесие. Но в первом оно будет соответствовать увеличению выхода аммиака, а во втором — резкому уменьшению.

Видите, какой сложной оказывается на деле как будто бы нехитрая реакция синтеза аммиака, как тщательно приходится подбирать наилучшие условия температуры и давления. Но и эти факторы еще не все, чтобы можно было говорить об успешном получении аммиака с большим выходом продукта.

Теперь вернемся к стеклянному сосуду, где заключена смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода и где не удается обнаружить ни единой капельки воды. Не нарушая герметичности сосуда, введем в него тонкую платиновую проволочку. И вот неожиданность. Проволочка нагревается, а сосуд наполняется туманом — водяными парами. Температура осталась неизменной, давление осталось таким же, а реакция, рассчитанная на тысячелетия, прошла в считанные секунды. Извлечем платиновую проволочку обратно, она совершенно не изменилась. Ее внешний вид, ее химический состав, ее масса точно такие же, какие были до опыта.

Мы оказались свидетелями очень важного явления в мире химических реакций. Это явление называется *катализом*. Вещества, в данном случае платина, которые во много раз ускоряют реакцию, сами при этом ничуть не меняясь, называются *катализаторами*. Катализаторов неисчислимое количество. Ими могут быть металлы, окислы самых различных элементов, соли, основания.

Важнейшие процессы химической технологии, например синтез аммиака, не обходятся без катализаторов. Самое обычное металлическое железо с примесью окислов алюминия и калия значительно ускоряет эту реакцию. Химия XX в. обязана своим неслыханным расцветом именно применению катализаторов. Разнообразные жизненные процессы протекают в живых организмах и растениях благодаря специальным катализаторам — энзимам. Химия неживого и живого — вот сфера действия удивительных ускорителей.

Но не всякий катализатор может ускорять данный процесс. Химики говорят, что катализаторы обладают избирательностью действия: могут активно влиять на одну реакцию, совершенно не обращая внимания на другую. Конечно, есть и исключения из этого правила. Скажем, та же окись алюминия способна катализировать несколько десятков реакций и в неорганической и в органической химии. И на синтез аммиака влияют различные катализаторы. Наконец, разные катализаторы могут заставить смесь одних и тех же веществ реагировать поразному, давать различные продукты.

Есть, оказывается, вещества не менее удивительные — *промоторы*. Взятые сами по себе, они равнодушно относятся к реакции. Взятые как примесь к катализатору, они ускоряют реакцию в гораздо большей степени, чем это сделал бы «одинокий» катализатор. Платиновая проволочка, «загрязненная» железом, аммиаком или двуокисью кремния, произвела бы в смеси водорода и кислорода еще более впечатляющий эффект.

Почему же все-таки катализаторы ускоряют химические реакции? Как будто бы действие катали-

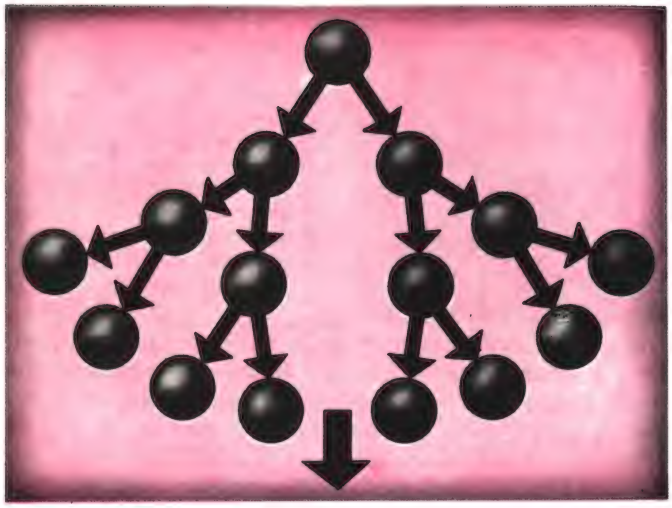


Схема цепной реакции.

затора подобно увеличению температуры. В сосуде образуются пары воды, если нагреть его на несколько сотен градусов Цельсия или же внести проволочку из платины. Результат один, а достигнут он разными способами. Для того чтобы нагреть сосуд, надо привлечь энергию извне. Тепло увеличивает количество активированных молекул и константу равновесия для реакции водорода и кислорода. Катализатор не вносит никакой дополнительной энергии. Он совершенно не влияет на константу равновесия. Он лишь помогает достичь равновесия в реакции образования воды и ускоряет во много раз наступление этого равновесия. Катализатор снижает энергию активации молекул водорода и кислорода, ту энергию, которая необходима для их быстрого химического взаимодействия. Платиновая проволочка разогревается благодаря теплу, выделяющемуся при стремительно происходящем синтезе воды.

Отчего же понижается энергия активации? В присутствии катализатора реакция протекает через образование неустойчивых промежуточных соединений. Для этого требуется меньшая энергия активации. Не такая большая, как для прямого взаимодействия кислорода и водорода. Вот почему проволочка из платины и произвела в смеси водорода и кислорода столь впечатляющее действие.

Есть, оказывается, кроме катализа положительного, катализ отрицательный, когда присутствие катализаторов не убыстряет, а, наоборот, замедляет течение реакций. Такие антикатализаторы носят название *ингибиторов*. Известны, например ингибиторы коррозии. Они снижают скорость коррозии металлических изделий. Очень эффективными замедлителями коррозии считаются, в частности, соли хрома и технеция (K_2CrO_4, $KTcO_4$) и множество других органических и неорганических веществ. Есть ингибиторы окисления нефтепродуктов, ингибиторы полимеризации и пр. Катализ, наконец, бывает гомогенный и гетерогенный. В первом случае и катализатор и реагирующие вещества образуют однородную систему. Окисление окиси углерода CO до углекислого газа CO_2 в присутствии паров воды — один из примеров гомогенного катализа. При гетерогенном катализе реагирующие вещества и катализатор находятся в разных фазах. Так, химическое взаимодействие между газами ускоряется твердым катализатором (синтез аммиака).

Ежегодно в мире появляются сотни статей и десятки книг, посвященных катализу. Многие ученые разных стран пытаются постичь причину каталитического действия. Одни считают, что активность катализатора зависит от его химического строения. Другие полагают, что катализ происходит в том случае, когда молекулы катализатора устроены подобно молекулам реагирующих веществ. Третьи не без основания ищут причину катализа в особых свойствах поверхности катализатора.

Студентам на лекции, посвященной химическим реакциям, демонстрируют очень впечатляющий опыт. В стеклянной колбе содержится смесь двух газов — хлора и водорода. При обычной температуре они реагируют очень медленно. Но колба почему-то упрятана под колпак из толстой проволоки. Лектор подносит спичку к магниевой стружке, держа ее вблизи колпака. Стружка вспыхивает ярким пламенем, происходит взрыв. Это цепная реакция взаимодействия хлора с водородом.

В мире химических процессов может существовать еще один вид реакций — *цепные*. Если нагреть колбу до 700° С, она тоже взорвется. Хлор и водород соединяются мгновенно, за долю секунды. Это и неудивительно. Ведь тепло во много раз повышает энергию активации молекул. Но в опыте, о котором мы только что рассказали, температура нисколько не менялась. Эту реакцию вызвал свет. Кванты, мельчайшие «порции» света, несут большую энергию, гораздо больше той, что требуется для активирования молекулы. Вот на пути светового кванта встречается молекула хлора. Квант разделяет ее на атомы и передает им свою энергию.

Атомы хлора оказываются в возбужденном, богатом энергией состоянии (отмечены звездочками). Такие атомы обрушиваются на молекулы водорода, разрывают их на атомы. Один из них соединяется с атомом хлора, другой остается на свободе:

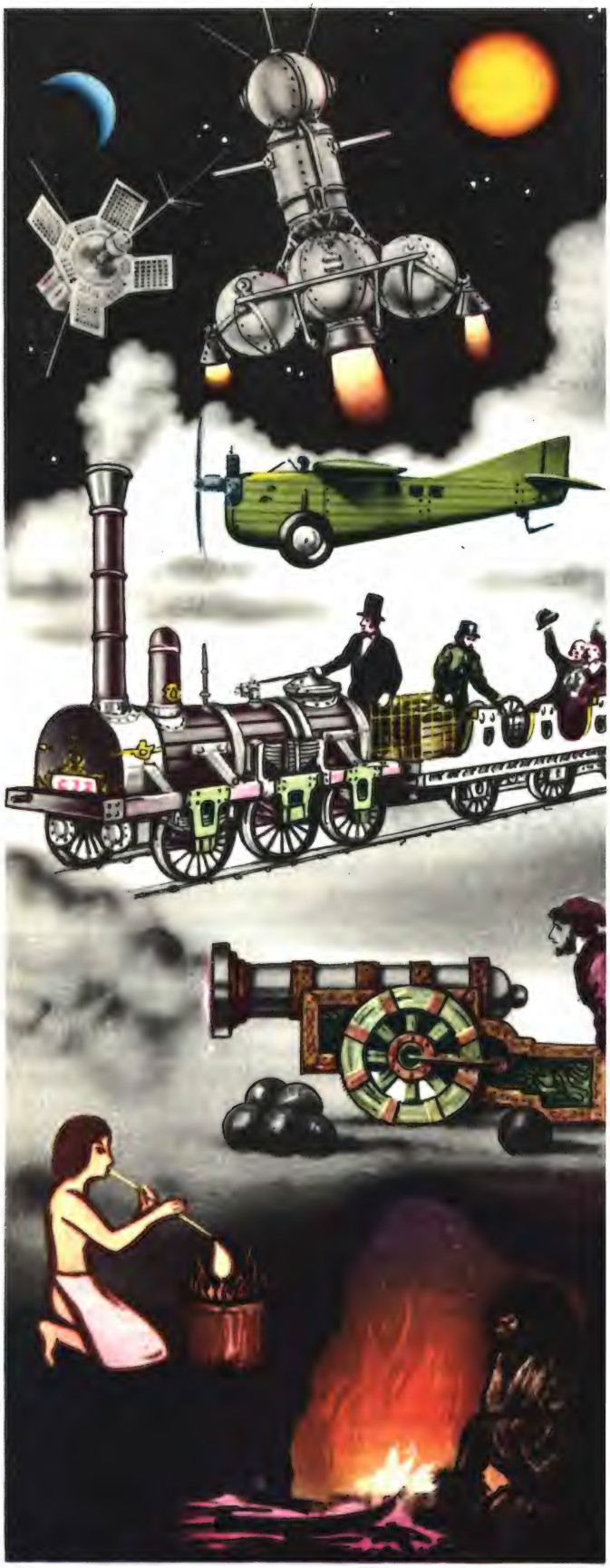
$$Cl^* + H_2 \longrightarrow HCl + H^*.$$

Но он возбужден. Он жаждет поделиться своей энергией с молекулой хлора. Как только он с ней сталкивается, молекуле хлора приходит конец:

$$Cl_2 + H^* \longrightarrow HCl + Cl^*.$$

И опять на свободе оказывается активный хлорный атом. Он недолго ищет, куда приложить свою силу:

$$Cl^* + H_2 \longrightarrow HCl + H^*.$$



История реакции горения в картинках.

И так получается длинная последовательная цепочка реакций; в ней повторяются все те «шаги», которые мы только что изобразили на бумаге. Стоит реакции начаться, как все новые и новые молекулы будут активироваться благодаря той самой энергии, которая выделяется в результате реакции. Скорость реакции нарастает подобно снежной лавине, несущейся с гор. Цепная реакция затихает, когда все молекулы будут увлечены ею, все молекулы водорода и хлора прореагируют. Каждая активированная светом молекула H_2 или Cl_2 создает около 100 000 элементарных реакций образования хлористого водорода.

Химики знают множество цепных реакций. Известны цепные реакции и физикам. Например, деление ядер урана нейтронами — пример физической цепной реакции.

Само слово «химия» стало теперь понятием собирательным, объединяющим внушительное количество научных дисциплин. Эти направления тоже изучают вещества и их превращения, но каждое направление — своими методами и способами, со своими целями и задачами. Каждое направление имеет ныне вполне самостоятельное значение.

Скажем, химия и электричество нашли общие интересы. Общность интересов породила новую науку — электрохимию (см. ст. «Большая задача электрохимии»). Когда вы включаете карманный фонарик, то знайте, что лучик света, прорезавший ночную тьму,— это результат электрохимической реакции, которая произошла в батарейке. Вы держите в руках нержавеющую хромированную ложку. Хромовое покрытие нанесено на стальной предмет благодаря электрохимическому процессу — электролизу. Электрический ток выделил из раствора хромовых солей металл и осадил его на поверхность ложки.

Свет и химия, объединившись, дали начало фотохимии. Эта наука изучает химические реакции, протекающие под действием света. С ней знаком каждый, кто занимается фотографией. Пленка покрывается специальной эмульсией, в состав которой входит бромистое серебро $AgBr$. Под действием света его молекула распадается на атомы. Куда упало больше света, там и образовалось больше атомов. Поэтому на кадре потемнения распределяются неравномерно, и эта неравномерность создает общий контур будущей фотокарточки.

А вот еще один фотохимический процесс. Именно благодаря ему на Земле существует кислород, которым мы дышим. Благодаря ему на нашей планете растет великое множество растений. Под влиянием солнечного луча в зеленом листе из углекисло-

го газа воздуха и воды, которую растение добывает из почвы, ежесекундно синтезируются ценнейшие углеводы и выделяется кислород. Процесс этот называется *фотосинтезом*. Каждый зеленый листочек — настоящая химическая фабрика, где происходят тысячи сложнейших химических реакций. Ученые еще не познали до конца процесс фотосинтеза. И, может, одна из главных задач будущей химии — изобрести искусственный «лист», в котором совершались бы те же самые процессы, что и в природе...

Когда химия применила для своих нужд радиоактивные излучения, родилась ее новая область — *радиационная химия*. Она сразу дала заметный практический выход. Например, начало развиваться производство высококачественных пластмасс с помощью радиационно-химической полимеризации мономеров. Радиационная химия предложила новые способы вулканизации каучука. Изготовленная таким путем резина отличается большой износоустойчивостью.

Или взять радиационный крекинг. Крекингом называется процесс расщепления сложных соединений, образующих нефть. При этом нефть обогащается простыми, легкими углеводородами, как насыщенными, так и ненасыщенными, из которых получают многие ценные органические продукты. Обычный крекинг проводят при высокой температуре и в присутствии катализатора. Радиационный крекинг этих условий не требует. Сильное гамма-облучение образцов нефти в короткий срок производит расщепление тяжелых углеводородов. В других условиях облучение может вызвать и обратный процесс. Из легких углеводородов — метана и этана — получают сложные ценные вещества: альдегиды, кетоны и органические кислоты. Ученые ищут пути, как непосредственно из азота получить азотную кислоту под действием радиоактивных излучений. Вот они, первые достижения радиационной химии, а раскрывшиеся перед ней горизонты поистине необозримы.

...Все, что было создано на Земле до человека, все, что он создал, и все, что он создаст в будущем,— это результат химических реакций, которые так же многообразны, как сам мир.

Удивительная судьба одного простого открытия (хроматография)

В 1903 г. русский ученый профессор Михаил Семенович Цвет, работавший в ту пору лаборантом, сделал открытие, которое осталось тогда почти незамеченным и вскоре надолго было забыто. А судьба этого открытия оказалась поистине удивительной.

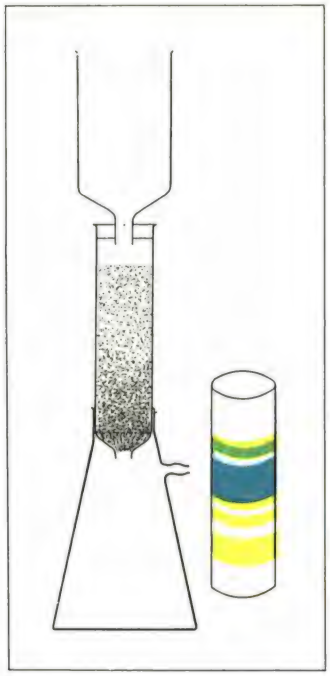
Хроматография (так назвал свое открытие профессор Цвет) стала в наши дни незаменимым методом разделения и анализа во многих отраслях науки и техники. Без нее были бы немыслимы достижения биохимии, сумевшей разобраться в невообразимой сложности строения и состава белковых соединений. Без хроматографии нельзя было бы успешно синтезировать многие трансурановые элементы периодической системы Менделеева. Методами хроматографии удается разделять и очищать лекарственные вещества, антибиотики, витамины, алкалоиды, гормоны. Хроматография широко применяется при поисках нефтяных месторождений. Без нее не может обойтись химик-органик, изучающий строение и состав сложнейших органических соединений. Другими методами немыслимо определить состав и природу изомеров. При помощи хроматографии удается детально изучить некоторые химические свойства многих редкоземельных элементов.

Не следует думать, что хроматографические явления используются только учеными в лабораториях или инженерами на заводах. Хроматографические явления составляют основу многих гигантских геохимических процессов, например образования почвы и многих рудных месторождений.

Что же открыл профессор Цвет?

Открытие М. С. Цвета было удивительно простым. Настолько простым, что его мог бы сделать любой школьник, обладающий пытливым умом, большой любознательностью и умением видеть, подмечать удивительное и необычное в простом.

Цвет интересовался природой хлорофилла, от которого зависит окраска листьев. Роль этого вещества в природе огромна: с его помощью в зеленом живом листе происходит превращение световой энергии солнца в химическую энергию органических соединений.



Первая хроматографическая установка профессора М. С. Цвета. В трубке *справа* отчетливо видны цветные зоны, соответствующие различным пигментам хлорофилла, извлеченного из зеленых листьев.

Профессор Цвет насыпал в стеклянную трубку тонко измельченный порошок чистого мела, смочил его бензолом, налил сверху немножко раствора хлорофилла, извлеченного из зеленого листа (самый верхний слой порошка, конечно, сразу окрасился в зеленый цвет), и стал медленно, по каплям промывать бензолом трубочку с мелом. По мере того как верхний зеленый слой промывался бензолом, окраска вслед за растворителем начала передвигаться в виде зеленого колечка вниз по трубке. Потом (в этом-то и заключалось замечательное открытие Цвета) зеленое колечко стало постепенно разделяться на несколько отдельных колец; ученый обнаружил узкую желтую полоску, она двигалась по трубке наиболее медленно, ее опередила желто-зеленая полоса, впереди которой шла широкая зелено-синяя полоса, перед ней две желтые и в самом низу двигалась еще одна полоса, тоже желтого цвета. Тщательный анализ показал, что над верхней желтой полоской располагалась еще одна — бесцветная.

Этот простой опыт, с одной стороны, положил начало разгадке великой тайны зеленого листа: было доказано, что хлорофилл в листе растения сложен, что он состоит из нескольких близких между собой, но различных химических соединений. С другой стороны, этот простой опыт лег в основу новой области науки.

Вот как образно рассказал о своем открытии сам автор: «Подобно световым лучам в спектре, различные компоненты сложного пигмента закономерно располагаются друг за другом в столбе сорбента и становятся доступными качественному и количественному исследованию. Такой расцвеченный препарат я назвал хроматограммой, а соответствующий метод анализа — хроматографическим методом».

Что происходит в хроматографической колонне?

Что же произошло в стеклянной трубочке, набитой порошком мела? Какие удивительные силы разделили сложную природную смесь многих химических веществ, настолько близких между собой, что отделить их друг от друга не удавалось самым искусным химикам?

Механизм хроматографического разделения теперь хорошо изучен. Лучше всего рассмотреть действие *хроматографической колонны* (так стали называть независимо от конструкции трубку с сорбентом) на простейшем примере знакомой нам трубки с мелом.

Зеленый раствор вытяжки из листьев обесцвечивается, как только приходит в соприкосновение с порошком мела, а мел становится зеленым. Молекулы всех соединений, входящих в состав хлорофилла, извлеченного из зеленого листа, осаждаются на поверхности частиц мела. Поглощение растворенного вещества, паров или газов поверхностью твердых тел или жидкостью химики называют *сорбцией*. На этом явлении и основаны все хроматографические методы разделения смесей, сверхтонкой очистки вещества и анализа.

Захваченные поверхностью твердого тела, молекулы не остаются на ней неподвижными. Они могут переходить обратно в раствор, снова поглощаться и вновь растворяться...

Бесчисленное множество раз меняет свое состояние каждая молекула, переходя с поверхности в раствор и обратно. Между раствором (бензол в опытах Цвета) и сорбентом (порошок мела) устанавливается равновесие: на поверхности частиц мела находятся *почти* все молекулы. В растворе их очень мало — *почти* нет совсем. Но в этом-то «почти» и заключается сущность хроматографического эффекта.

Немногие молекулы, находящиеся в растворе, увлекаются вниз по трубке вместе с потоком растворителя. Но по пути они немедленно осаждаются вновь на другие частицы мела, а вместо них переходят в раствор новые молекулы. Это повторяется огромное число раз. Поток растворителя непрерывно поступает сверху в трубку. В верхней части сорбированного вещества становится все меньше и меньше, в нижней части — все больше и больше. Постепенно цветная прослойка продвигается в виде колечек (зон) через сорбент вниз по трубке.

Молекулы с разным составом или строением сорбируются на твердой поверхности по-разному. Одни

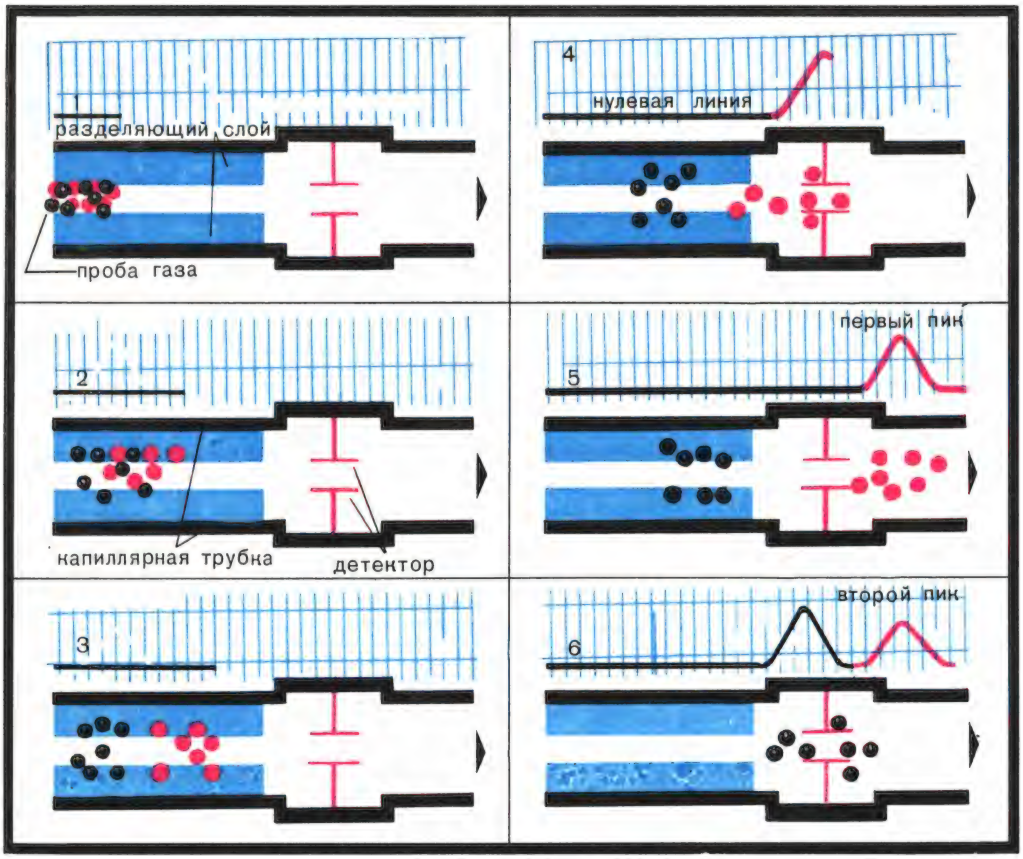


Схема разделения смеси из двух компонентов (красные и черные молекулы) на капиллярной колонке. Сначала молекулы движутся вместе (*1*), затем красные молекулы несколько опережают черные (*2*) и заметно обгоняют их (*3*). При попадании красных молекул в детектор (*4*) на нулевой линии появляется пик первого компонента (*5*), а при попадании в детектор черных молекул на нулевой линии записывается пик второго компонента (*6*).

из них немного прочнее, другие несколько слабее. Одни дольше находятся в связанном состоянии и меньше в растворе. Другие чуть дольше первых задерживаются в растворе и, конечно, быстрее увлекаются потоком растворителя.

Поэтому окрашенная смесь различных веществ постепенно разделяется на свои составные части. Каждая такая часть сосредоточивается в своем слое. И эти слои отличаются друг от друга цветом. Двигаясь с разной скоростью вдоль трубки, эти слои расходятся все дальше друг от друга. Так и образуется хроматограмма. Каждое отдельное цветное кольцо соответствует химическому соединению.

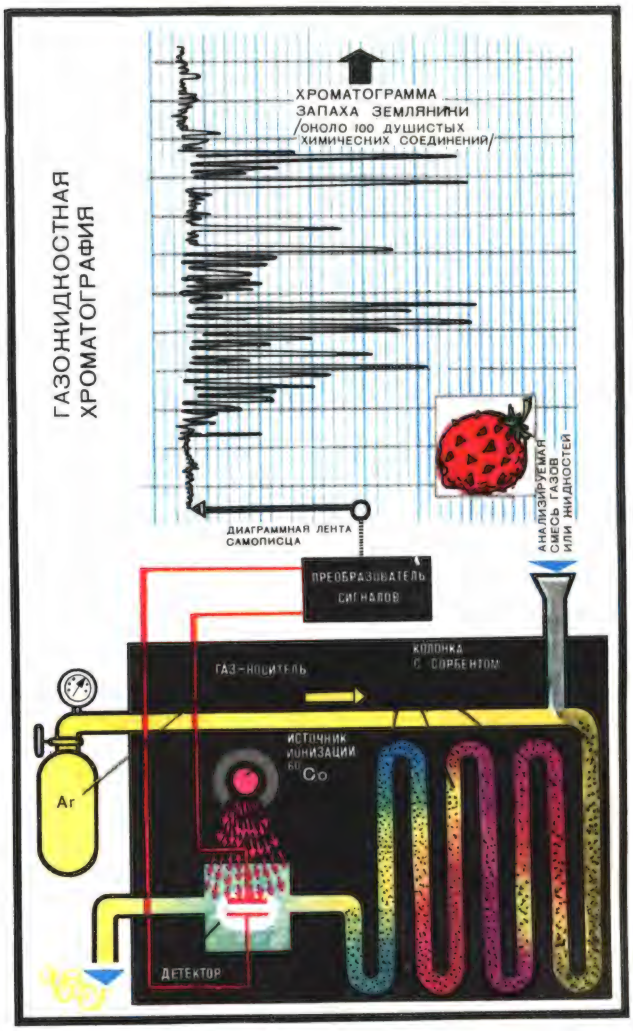
Вытолкнув столбик сорбента из трубки, можно вырезать из него различно окрашенные слои и получить каждое отдельно в чистом виде. Можно поступить еще проще: продолжая промывку бензолом, собирать раствор от каждого цветного слоя отдельно, по мере того как они, пройдя колонну, начнут выходить из нее с потоком растворителя.

Движение молекул в хроматографической колонне напоминает как бы состязание спортивных команд в беге на очень длинные дистанции. Микробегуны в разных спортивных костюмах, например в опыте с хлорофиллом — в желтых, зеленых и синих, бегут с одинаковой скоростью (скорость потока растворителя). Но свое право отдыхать по дороге каждая команда использует по-разному. Все они сидят на поверхности очень подолгу (находятся в сорбированном состоянии). Все они бегут очень короткое время (увлекаются потоком бензола). Но первая команда отдыхает все же чуть меньше второй, а вторая — чуть меньше третьей. Конечно, те бегуны, которые отдыхают меньше, и опередят своих соперников.

Таким образом, даже небольшие различия в скорости поглощения (сорбции) и обратного выделения вещества в раствор (десорбции) позволяют осуществлять разделение смесей хроматографическим способом. А эти ничтожные различия в сорбционной способности молекул, в свою очередь, зависят от их химической природы.

А если вещество бесцветно?

Хроматография — этот удивительный по простоте способ разделения сложных смесей — и в наши дни нередко применяется химиками почти в том же виде, в каком ее создал автор. Сотни различных твердых веществ изучили химики, выбирая наиболее подходящие сорбенты. Еще больше было исследовано различных растворителей. Очень часто решить самые трудные проблемы помогало применение простых и обычных материалов. Создавать но-



Хроматограмма запаха свежей земляники, полученная на хроматографе с ионизационным детектором.

вые сорбенты помогает развивающаяся полимерная химия. Синтезированные пористые полимеры позволяют разделять как газы, так и высококипящие вещества на одной и той же колонке.

Не следует думать, что хроматография помогает изучать только окрашенные вещества. Разработаны многочисленные способы, с помощью которых обнаруживают на хроматограмме и бесцветные зоны. Для этого, например, применяют ультрафиолетовые лучи, под действием которых очень многие вещества флюоресцируют и невидимые зоны на хроматограмме начинают светиться. Можно бесцветные зоны «проявить», обработав сорбент реактивом, который образует с изучаемым веществом окрашенное соединение. Почти любое физическое свойство вещества может быть использовано для обнаружения его на выходе из хроматографической колонны.

Чем пахнет земляника

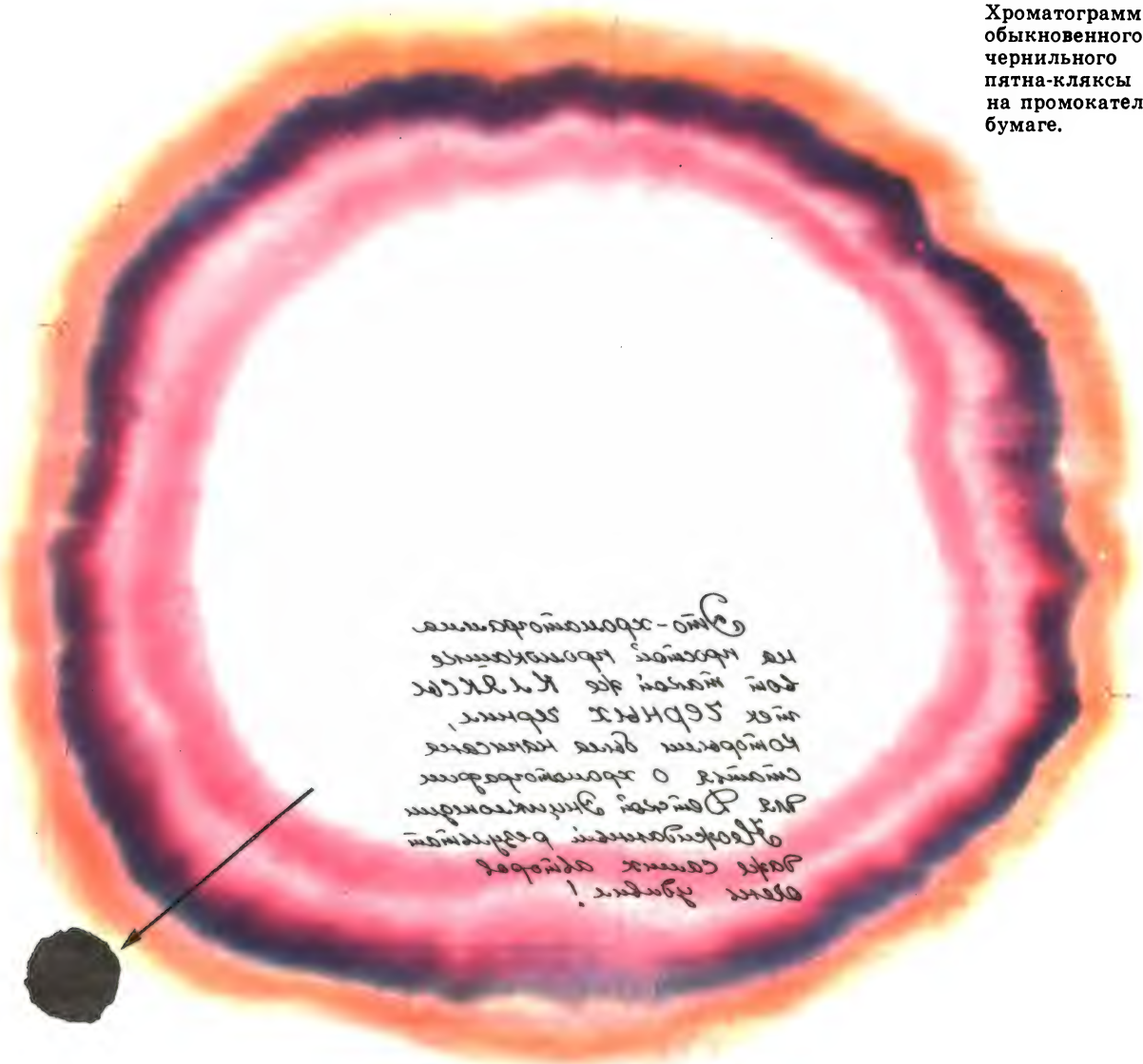
Химики создают теперь новые, еще более мощные методы хроматографического анализа. Среди них в первую очередь следует назвать *газожидкостную хроматографию* с ее исключительной чувствительностью. Сорбентом в ней является нелетучая жидкость, которой смочен, например, порошок обыкновенного кирпича, а движущейся средой — любой инертный газ. При помощи этого метода исследуют сложные смеси, содержащие сотни компонентов.

Самая удивительная хроматографическая разделительная колонна устроена очень просто. Это тоненькая металлическая или пластмассовая трубочка с диаметром канала всего 0,2—0,4 мм. Стенки этой трубочки смочены разделяющей нелетучей жидкостью. Чтобы можно было достичь высоких степеней разделения, трубочку иногда приходится делать очень длинной. Так, например, чтобы провести анализ... аромата свежей земляники, потребовалась колонна длиной 120 м. Свернутую в спираль трубку поместили в термостат, температура в котором равномерно повышалась. Это было необходимо для того, чтобы изучить и те труднолетучие компоненты приятного земляничного запаха, которые могут выделяться ягодой только в солнечный жаркий день. Через колонну пропускали инертный газ аргон. Он был выбран не случайно. Аргон легко передает свою энергию, полученную при облучении радиоактивными источниками, органическим веществам, которые при этом ионизируются. Образуется электрический сигнал, который после усиления подается на записывающее устройство. Чувствительность такого прибора (детектора) необычайно велика. Можно уверенно определить... одну тысячемиллиардную долю грамма вещества (10^{-12} г). А всего для полного анализа сложнейшей смеси достаточно нескольких миллиграммов.

Запах свежей земляники оказался очень сложным. Чтобы создать аромат ее спелых ягод, прелесть которого невозможно описать словами, в таинственной лаборатории растения синтезируется не менее *девяноста шести* сложнейших органических душистых соединений.

Колонна длиной... в полкилометра

Благодаря ионизационным детекторам газовая хроматография по чувствительности сравнима со спектральным и масс-спектрометрическим методами анализа.



Хроматограмма обыкновенного чернильного пятна-кляксы на промокательной бумаге.

Насколько сложны проблемы современной техники, успешно решенные хроматографией, можно представить себе на примере анализа природной нефти. Чтобы изучить состав нефти, потребовалось сконструировать капиллярную колонну длиной около *пятисот* (500!) метров. Удалось не только установить число различных компонентов в сырой нефти (их оказалось около *шестисот*), но и расшифровать, что представляет собой каждый из них. В 1965 г., когда авторы писали статью на эту тему для 2-го издания Детской энциклопедии, ученым было известно только 230 компонентов.

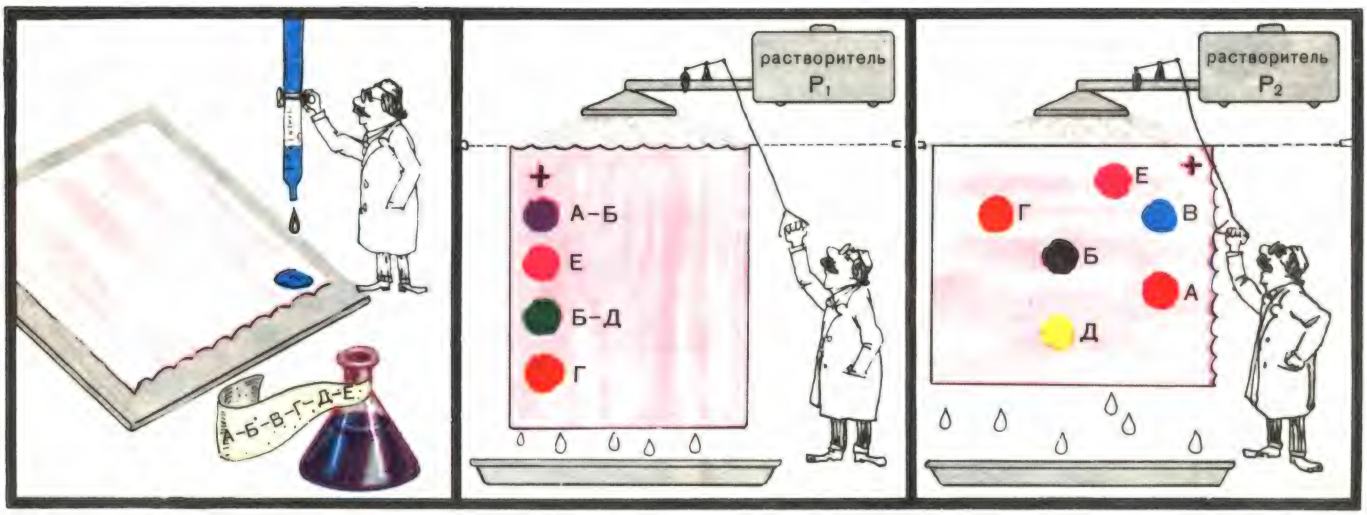
Хроматография на листе бумаги

Трудно даже представить, что самый обыкновенный лист бумаги может служить своеобразной лабораторией химического анализа. На нем определяют состав природных химических соединений, разделить которые бессильны многие другие методы аналитической химии.

Простейшую хроматограмму на бумаге нетрудно получить самому. Возьмите лист промокательной или лучше фильтровальной бумаги. Смешайте по капле синие и красные чернила. Годится и смесь любых растворимых в воде красок, лишь бы они не реагировали химически друг с другом.

Нанесите маленькую капельку смеси в центр бумажного листа. Затем точно в середину цветного

Нередко встречаются сложные смеси, которые невозможно разделить при помощи одного растворителя. Тогда полоску с нанесенной на нее пробой смеси последовательно обрабатывают двумя различными растворителями P_1 и P_2 в двух перпендикулярных направлениях. На такой двухмерной хроматограмме приходится расставаться самым близким по свойствам веществам.



пятнышка вводите по каплям воду. Впитается одна — капните другую. И вскоре по листу бумаги начнет расползаться настоящая красочная хроматограмма: синее пятно внутри и красное кольцо вокруг. Несколько разных капель и немного терпения — и можно получить изумительно красивые узоры.

Хроматограммы на бумаге чаще всего получают на бумажных полосках. Такую полоску подвешивают вертикально и нижний ее конец погружают в сосудик с растворителем. Впитываясь в бумагу и поднимаясь по ней вверх, растворитель с разной скоростью перемещает из нанесенного на полоску пятна смеси отдельные составные части. На бумажной полоске образуется хроматограмма — пятна.

Пятна на хроматограмме иногда невидимы. Тогда полоску обрабатывают раствором реактива, дающего цветное окрашивание с составными частями смеси. По положению цветных пятен, по их окраске можно определить, что входит в состав изучаемой сложной смеси. Трудноразделяемые смеси часто обрабатывают дважды, разными растворителями, в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В результате получают двухмерную хроматограмму.

Хроматография и биохимия

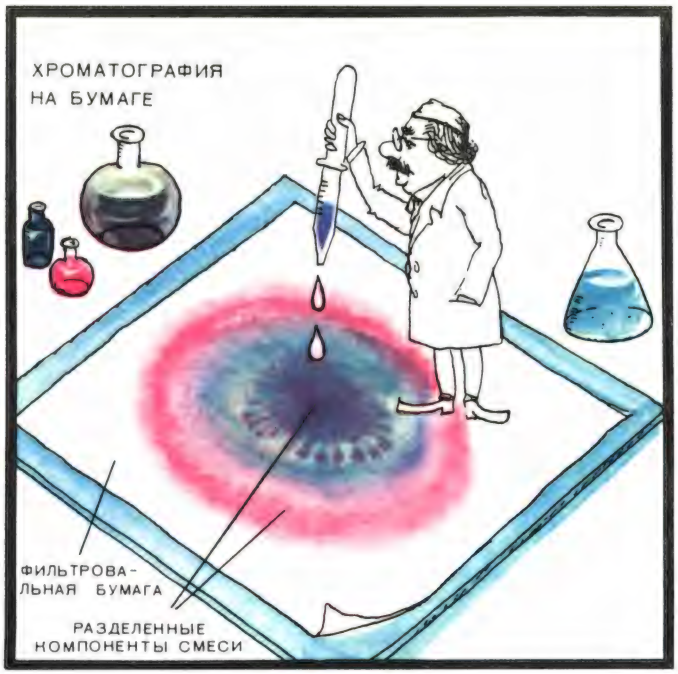
Современная биохимия сумела выяснить немало загадочных процессов, протекающих в живом организме; в этом биохимия многим обязана хроматографии. Наука нашего времени расшифровала состав и строение белка в живом организме. Труднейший и важнейший раздел биологической химии — химия природных белковых соединений вообще, вероятно, не могла бы успешно развиваться без помощи хроматографии.

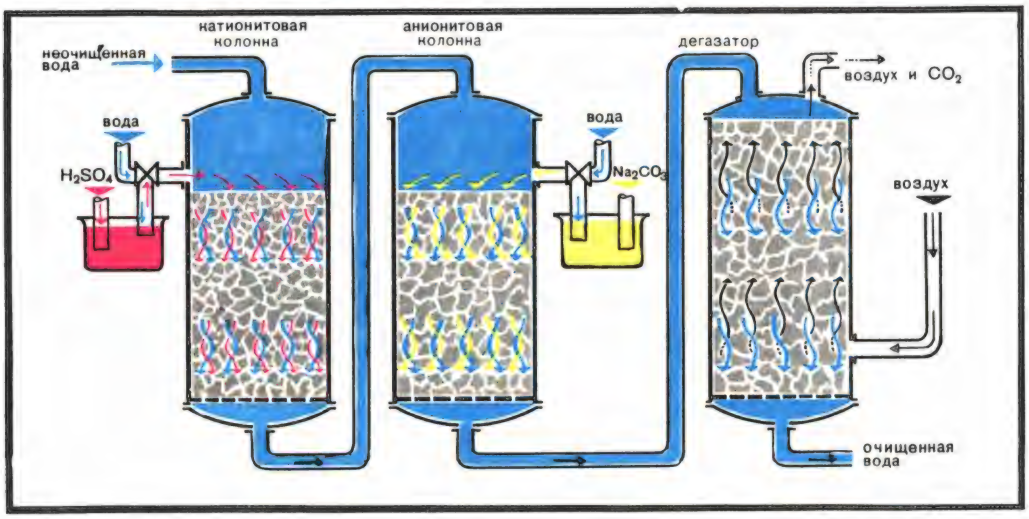
Хроматограммы не только дали ученым средство изучить, из каких составных частей, из каких аминокислот состоит белок различных живых организмов, но (с неполным гидролизом — осторожным расщеплением белковых молекул) позволили даже определить чередование различных аминокислот в молекуле белка. Хроматография помогает быстро определять аминокислотный состав белка. С помощью этого метода приготовляют высокоэффективные кормовые рационы для животных.

Хроматографическими методами изучают витамины, гормоны, антибиотики, алкалоиды. С их помощью производится очистка этих веществ, их анализ, контроль производства. Этим хроматография помогает побеждать тяжелые болезни человека.

Весьма вероятно, что хроматография поможет разрешить великую загадку фотосинтеза в зеленом листе. Если человек овладеет этим процессом, одним из самых грандиозных в природе, наиболее сложным и неясным, он овладеет неиссякаемым источником энергии. Открытие тайны фотосинтеза было бы значительно более важным, чем овладение атомной энергией. Хроматография уже помогает исследовать сложнейшую цепь химических реакций в освещенном солнцем зеленом листе.

Быть может, недалеко то время, когда человек научится улавливать солнечную энергию с такой же эффективностью, как это делает живой зеленый лист. Можно не сомневаться, что немалая заслуга в этом будет принадлежать и хроматографии.





Воды на Земле очень много, но далеко не всю ее можно использовать из-за высокого содержания солей. Ионообменная хроматография превращает морскую и соленую воду пустынь в пресную.

Хроматография в борьбе за здоровье человека

Немало людей курит, причем некоторые становятся курильщиками с детства. Недавно ученые, используя хроматографический анализ, расшифровали состав дыма сигар и сигарет. Оказалось, что он состоит из сотни различных соединений, в том числе особо вредных для здоровья канцерогенных веществ, вызывающих раковые заболевания.

Иногда хроматография получает совершенно неожиданные задания. Некоторые зарубежные спортсмены перед соревнованиями употребляют различные возбуждающие средства — допинги. Они вредны для здоровья, но помогают незаслуженно выигрывать состязания. Употребление допингов запрещено, а эффективные методы контроля отсутствуют. И вот на Олимпийские игры в Мехико (1968) был привезен газовый хроматограф со специальным заданием: определять содержание возбуждающих средств у спортсменов. Достаточно было взять на анализ капельку крови, чтобы определить любителей незаслуженных побед.

Газовая хроматография помогает определять в пищевых продуктах даже малейшие следы пестицидов — химических веществ, которые уничтожают вредных насекомых. Однако излишнее употребление их приводит к тому, что вместе с пищей пестициды попадают в организм человека.

С помощью хроматографии быстро анализируют состав промышленных выбросов, заражающих атмосферу.

Слева — хроматограмма разделения на бумаге смеси синих и красных чернил. Такую хроматограмму нетрудно получить самому. Внося в центр листка смоченной фильтровальной бумаги каплю смеси красных и синих чернил и аккуратно нанося по каплям чистую воду, вы скоро получите точно такую же картину. *Справа* — кольцевая хроматограмма на бумаге сложной смеси шести различных аминокислот, проявленная четырьмя разными реактивами.

Тонкослойная хроматография

Очень похожа на бумажную хроматографию хроматография в тонком слое. На стеклянную или пластмассовую пластинку наносят тонкий равномерный слой хорошо измельченного сорбента. Сам процесс хроматографического разделения идет так же, как и на бумаге. Тонкослойная хроматография обладает существенными преимуществами: разделение протекает значительно быстрее, а главное, легче выбрать наиболее подходящие сорбенты.

Ионообменная хроматография

Метод ионообменной хроматографии ничем не отличается от способа профессора Цвета, только вместо нейтрального сорбента — мела, крахмала, угля и т. п. — в ионообменной хроматографии применяются специально для этого созданные химиками новые полимерные вещества — ионообменные смолы. Все они обладают замечательной способностью: каждая крупинка такого сорбента — как бы гигантская молекула кислоты (смолы-катиониты) или основания (смолы-аниониты) — вступает в реакцию химического обмена.

Ионообменные смолы нерастворимы. Если хроматографическую колонну наполнить тонким порошком такой смолы, из пропускаемого через него раствора будут поглощаться ионы тяжелых металлов и взамен в растворе появится кислота или щелочь. В таких колоннах теперь, например, очищают воду для питания паровых котлов на больших тепловых электростанциях. Сначала вода проходит через фильтры и очищается от ила, взвешенных в ней глинистых и песчаных частичек, потом поступает в колонну, наполненную катионитовой смолой. В этой колонне из воды полностью поглощаются соли кальция и магния, делающие воду «жесткой», вместо них появляются ионы водорода — образуется кислота. Вода, подкисленная в результате химического обмена, проходит анионитовую колонну, где обмениваются анионы образовавшихся кислот на гидроксильные ионы, которые тут же сразу нейтрализуются водородными ионами, и получается чистая вода. Ионообменные смолы превращают морскую, засоленную воду в пресную, пригодную для питья, снабжают питьевой водой и жителей солончаковых пустынь, и экипажи морских кораблей.

Ионообменная хроматография уже сейчас помогает извлекать ценные металлы из промышленных сточных вод, а скоро гигантские ионообменные хроматографические колонны, установленные на берегах морей, начнут извлекать из Мирового океана безграничные запасы ценных для техники металлов: урана, золота и др.

Хроматография и периодический закон

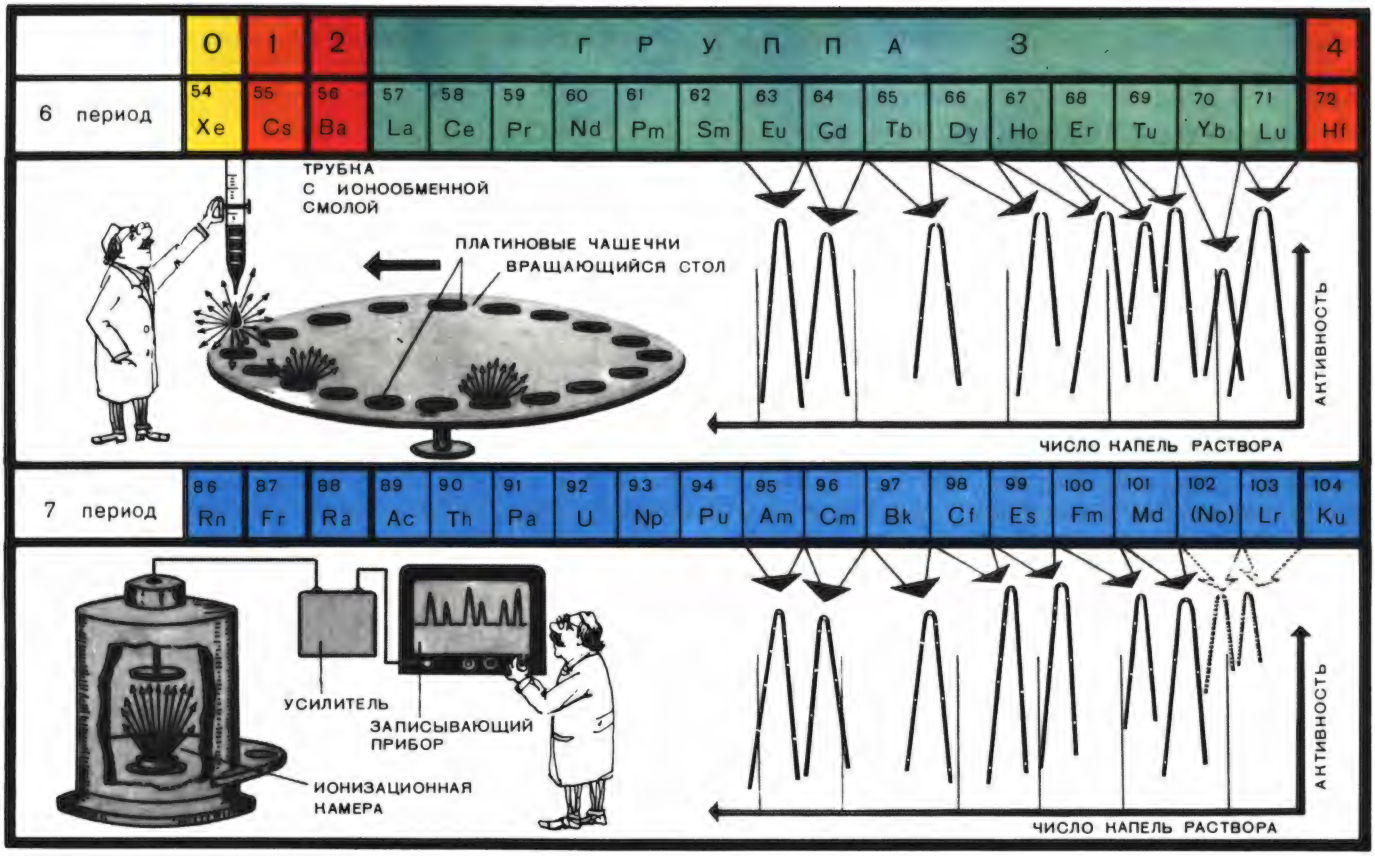
До сих пор химики еще не закончили спор о том, как должен быть построен последний, седьмой период менделеевской таблицы. Этот вопрос для науки особенно важен и принципиален. Теория на него может дать лишь приблизительный ответ. Остается детально изучать химические свойства каждого элемента — тот путь, которым шел Менделеев. Зная химические свойства нового элемента, можно найти ему место в периодической таблице. Для того же, чтобы их изучить, надо новый элемент иметь в руках.

Ионообменная хроматография помогла науке найти выход из этого трудного положения. Действительно, совсем еще недавно нельзя было и мечтать о том, чтобы изучать химические свойства элемента, имея в руках всего *несколько атомов*. Хроматография предоставила науке эту поистине чудесную возможность.

Загадка седьмого периода в периодической таблице могла быть разрешена только путем сравнения трансурановых элементов с элементами предшествующих периодов — шестого и пятого (см. ст. «Великий закон»).

Решение этой трудной, важнейшей для химии задачи было найдено благодаря хроматографии. Полученную смесь радиоактивных изотопов редкоземельных элементов разделили на ионообменной хроматографической колонне. Радиоактивность каждой капли раствора, вытекающего из колонны, измерялась отдельно. Оказалось, что чем выше порядковый номер элемента, тем быстрее он выходит из колонны при хроматографическом разделении. И чередование элементов в порядке выхода их из ионообменной колонны удивительным образом точно соответствует их взаимному положению в периодической системе элементов. Затем при тех же условиях (на той же колонне, наполненной той же ионообменной смолой, с применением того же состава раство-

При помощи ионообменной хроматографии были открыты и исследованы тяжелые трансурановые элементы. На рисунке сопоставлено положение редкоземельных и трансурановых элементов в периодической таблице с хроматограммами изменения активности вытекающего из колонки раствора. На основании аналогии строения и свойств элементов этих двух рядов было предсказано, в каких именно каплях раствора, выходящего из хроматографической колонки, следует искать атомы новых трансурановых элементов. Капли собирались в плоские платиновые чашечки, высушивались, после чего чашечки помещали в ионизационную камеру для измерений радиоактивности. Именно таким образом был открыт менделевий, хотя в каждом опыте у исследователей был всего один атом.

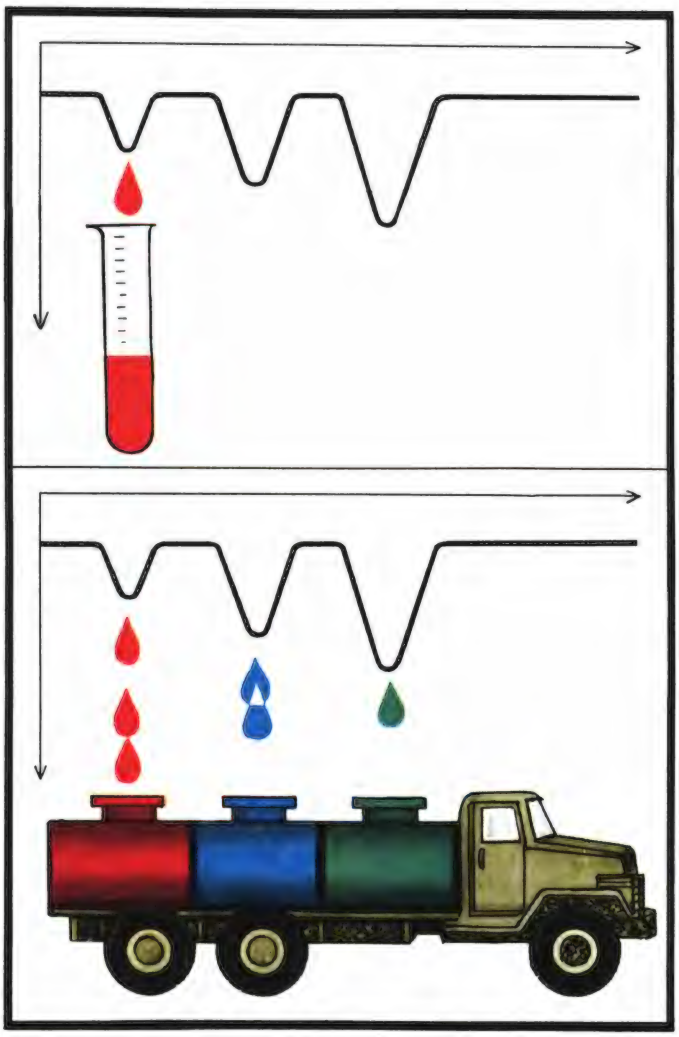


Двухмерная хроматограмма сложной смеси 14 различных аминокислот. Эта хроматограмма получена из одной капли раствора смеси кислот, нанесенной в точку, обозначенную кружочком. Проявление велось поочередно в двух направлениях разными реактивами. Каждая метка-пятно принадлежит одной аминокислоте. По окраске и положению пятна можно совершенно точно установить природу вещества.

рителей) были подвергнуты хроматографическому разделению четыре трансурановых элемента: америций (№ 95), кюрий (№ 96), берклий (№ 97) и калифорний (№ 98) — и измерялась активность каждой капли раствора.

Результат был прост и поразителен. Хроматография позволила установить малейшую разницу физико-химических свойств новых элементов. Оказалось, что они действительно очень сходны между собой; что они, так же как и редкие земли, выходят из хроматографической колонны в порядке, строго соответствующем их положению в периодической системе,— раньше появляется тот элемент, у которого порядковый номер больше. Стало возможным уловить тончайшие различия в сходном строении электронных оболочек атомов, изучая взаимное расположение кривых активности на хроматограммах.

Каждое новое вещество, выходящее из хроматографической колонки, отмечается на диаграмме сигналом в виде пика. Вещество, выход которого регистрируется таким пиком, можно извлечь из раствора или газовой смеси, собрать и выделить в чистом виде. Этот метод все шире применяется для разделения очень сложных смесей и в ближайшее время станет промышленным методом получения чистых веществ.



Химия одного-единственного атома

Слова «наука» и «чудо» вовсе не противоречат друг другу. Нельзя считать, что задача науки — разоблачать чудеса. Будет гораздо правильнее утверждать, что наука-то и создает подлинные чудеса, делает сказочно немыслимое реальным и действительным.

Таким подлинным чудом, чудом, осуществленным самой могущественной силой в мире — человеческим разумом, было создание и открытие 101-го элемента.

Величайший критерий истинности научных положений — это, бесспорно, возможность предсказания.

Результаты хроматографического исследования показали химическое сходство между лантаноидами и трансурановыми элементами. Эти результаты дали исследователям основание предсказать, что те трансурановые элементы, которых еще нет, которые еще только должны быть созданы человеком и должны быть выделены, изолированы и изучены, которые еще только будут открыты,— элементы с порядковыми номерами 99, 100, 101 — должны быть аналогами редкоземельных элементов: гольмия (№ 67), эрбия (№ 68) и тулия (№ 69). Следовательно, их надо искать хроматографическим методом в сложной смеси продуктов ядерного синтеза, и на хроматограмме они будут располагаться в строго определенном порядке, точно в таком же, как и их собратья,— сначала 101, затем 100 и, наконец, 99. Это предсказание оказалось настолько исчерпывающим, что можно было заранее предвидеть, в какой по порядку капле раствора, вытекающего из хроматографической колонны, будут содержаться атомы еще не существующего элемента.

Предсказание подтвердилось с поразительной точностью: методами хроматографического анализа были открыты эйнштейний (№ 99) и фермий (№ 100).

Все труднее и труднее достигается ядерный синтез новых элементов. Все короче оказывается период их существования. Все меньше и меньше атомов получают исследователи в конце долгой и сложной работы. Поиски методов ядерного синтеза, выслеживание новых трансурановых элементов, «охота» за ними напоминают увлекательную приключенческую повесть.

Получение последних трансуранов сопровождалось такими трудностями, что в ядерной реакции и ожидать было нельзя сколько-нибудь заметного выхода 101-го элемента. В этом опыте облучалась мишень — золотая пластинка с нанесенным на нее одним миллиардом атомов эйнштейния. Теория и расчет показывали, что за один опыт нельзя было на-

Удивительное совпадение

Название «хроматография» было предложено ее основоположником М. С. Цветом. Оно было подсказано ему цветными колечками — слоями мела в стеклянной трубочке, окрашенными в разные цвета хлорофиллом зеленого листа, который как будто бы сам записал таким способом, из чего он состоит (по-гречески «хроматос» — цвет, «графо» — пишу). Занятно и удивительно совпадение имени автора и созданной им области науки.

деяться получить *больше одного атома* элемента № 101.

Трудности фантастической «охоты» за *одним-единственным атомом еще не существующего элемента* не испугали известного американского ученого Глена Сиборга. Основываясь на непреложной справедливости закона Менделеева, он вместе со своими сотрудниками предпринял смелый, заведомо долгий и трудный поиск. Залогом успеха в их работе было то, что они уже владели хроматографическим методом. Только благодаря хроматографии можно было по химическому поведению одного или двух атомов правильно судить о химии нового элемента. Каждый атом тысячи и тысячи раз участвует в одних и тех же химических реакциях (адсорбция — растворение).

После упорной и долгой работы, после многих и горьких неудач и разочарований отважные исследователи были вознаграждены высшей для ученого наградой — открытием новой тайны природы: им удалось так поставить опыт, что стало возможным обнаружить *один* (!) атом нового элемента и *установить* его химическую природу.

Вдумайтесь в чудо, совершенное наукой. Исследователи сумели найти один-единственный, впервые возникший по воле человека атом никогда ранее не существовавшего элемента, потому что они заранее знали, где, в какой именно из многих капелек, вытекающих из стеклянной трубочки, должен находиться этот неведомый еще атом.

И каждый раз, когда снова и снова повторялся этот удивительный опыт, созданный человеком единственный атом нового элемента послушно и аккуратно выходил из хроматографической колонны точно в заранее предсказанной капле раствора.

В честь Менделеева, великого русского ученого, идеи которого были путеводной звездой на долгом и тяжелом пути к созданию новых элементов, американские ученые назвали 101-й элемент менделевием. Увлекательная история его открытия — хороший пример преемственности и дружбы в науке.

Хроматография сегодня...

Хроматография — скромная труженица. Главная ее задача — помогать другим отраслям науки. В наши дни уже ни одна область естествознания не может обойтись без точных, быстрых и исключительно чувствительных хроматографических методов.

Как аналитический метод хроматография далеко опередила все остальные методы физико-химического анализа. Даже спектральный анализ и тот уже отстает теперь по своей чувствительности от газовой хроматографии. Без нее была бы невозможна великая победа физики и ядерной химии — синтез и выделение в чистом виде новых искусственных элементов. Методом ионообменной хроматографии было обнаружено присутствие одного атома нового элемента. И в других областях науки, например при определении органических соединений, достижения хроматографии совсем недавно показались бы чудом; химики могут теперь уверенно обнаруживать некоторые вещества, даже если они присутствуют в количестве, не превышающем тысячи молекул в кубическом сантиметре.

Хроматография помогает химикам разбираться в тончайших различиях химических свойств близких по строению молекул.

Только хроматография позволила одновременно определять вещества в одной пробе, не превышающей тысячной доли грамма. Она позволяет обнаружить одновременное присутствие свыше сотни различных сложнейших химических соединений. И химик может любое из них выделить в чистом виде, не разрушая и не изменяя его.

Эти замечательные возможности хроматографии помогают биохимикам следить за быстрыми и сложными превращениями веществ в живых организмах, изучать механизм протекающих в них бесчисленных и сложнейших химических превращений. Тем самым начат штурм величайшей из тайн природы — тайны жизни.

Очень много у хроматографии и чисто практической повседневной работы буквально во всех областях науки и техники. В атомных лабораториях и на атомных заводах она помогает ученым и инженерам, работающим в области ядерной химии, выделять новые изотопы; геологам — разгадывать тайну происхождения и состав нефти, искать новые нефтяные и газовые месторождения; инженерам-химикам — анализировать сложнейшие смеси природных лекарственных веществ, вести непрерывный контроль за ходом производства; гигиенистам и медикам — предупреждать загрязнение воды и атмосферы, лечить болезни; криминалистам — разгадывать преступления; агрохимикам и почвоведам — следить за судьбой удобрений, внесенных в почву, и добиваться высоких и устойчивых урожаев.

...и завтра

В наши дни роль и значение хроматографии в науке и технике необозримы и необъятны. Но еще удивительнее и фантастичнее ее ближайшее будущее. Конечно, методы хроматографии будут совершенствоваться, анализы будут более чувствительными, точными и быстрыми. Появятся новые приемы разделения. Уже сейчас разрабатываются хроматографические процессы под высоким давлением и при высокой температуре и без движущейся среды. Разрабатываются новые экспрессные методы анализа. Ученые-химики надеются, что скоро хроматография научится не только обнаруживать различные химические соединения, но и определять природу и строение отдельных молекул в сложной смеси. Это откроет перед химической наукой новые необозримые возможности. Хроматография поможет и в космических исследованиях. На ракетных кораблях, устремленных к ближайшим планетам, будут установлены хроматографы для изучения атмосферы и грунта далеких планет. Химики и технологи уверены, что скоро будут созданы промышленные методы крупнотоннажного производства многих веществ хроматографическим путем. При этом будут получать вещества высокой чистоты, с новыми замечательными свойствами. Новое развитие получит хроматография крупных молекул — то, с чего начинал М. С. Цвет,— но уже на новой научной и технической основе.

Исключительная чувствительность и высокая скорость хроматографического анализа, его высокая точность позволяют возложить на хроматографию еще одну неожиданную обязанность — руководить химическим производством. Инженеры-химики стремятся создать новые удивительные химические заводы, заводы-автоматы, на которых люди будут освобождены от трудной и опасной работы. Хроматографический автоматический анализатор будет с недостижимой для любого, даже самого опытного аппаратчика точностью и вниманием следить за ходом технологического процесса, следить неотступно и непрерывно, никогда не уставая и не отвлекаясь. Сигналы анализатора о составе продукта будут поступать на быстродействующее вычислительное устройство, которое сможет немедленно принимать нужное решение и будет автоматически вести производственный процесс в наиболее выгодном режиме, заставляя механизмы выполнять автоматически все необходимые операции. А самое главное в том, что на заводах, управляемых хроматографическими анализаторами, можно будет получать такие вещества, которые другим путем получить невозможно.

Хроматография — путь к химическим заводам-автоматам будущего. Быть может, ты, читатель, построишь первый такой завод. Хроматография тебе поможет!

Большая задача электрохимии

(топливные элементы)

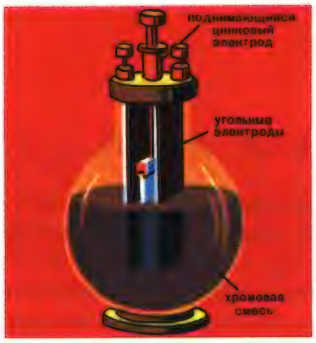
Почему не выгодна тепловая машина

Трудно представить себе нашу жизнь без электрической энергии. Электричество освещает города и села, плавит металл в электропечах, приводит в движение миллионы станков, питает радиостанции и совершает тысячи других полезных дел. Около 80% электроэнергии дают тепловые станции, где в гигантских котельных сжигают мазут, уголь, сланцы, торф, природный газ, и лишь 20% электроэнергии вырабатывают гидростанции.

Усилия ученых направлены на совершенствование процесса получения электроэнергии из топлива. Процесс этот выглядит так. При химической реакции горения (окисления) топлива выделяется энергия тепловая, благодаря ей в котле расширяется пар и приводит в действие лопасти паровой турбины — возникает энергия механическая. Механическая энергия, в свою очередь, побуждает к работе электрический генератор. Так возникает целая цепочка превращения энергии:

энергия химическая → энергия тепловая → энергия механическая → энергия электрическая

По закону сохранения при каждом преобразовании энергии общее количество ее не изменяется, энергия не теряется безвозвратно и не возникает из ничего. Казалось бы, для практики безразлично, каким образом один вид энергии превращается в другой. Но разные виды энергии неравноценны.



В первой половине XIX в. единственными практическими источниками электрического тока были гальванические элементы — электрохимические источники тока. Благодаря им стали возможны многочисленные открытия в области теории электричества.

Механическую и электрическую энергии можно непосредственно и полностью использовать в виде любой полезной работы и практически полностью превратить в любой другой вид энергии. Иначе обстоит дело с тепловой энергией. Если попытаться превратить тепловую энергию в механическую, какая-то ее доля всегда останется неиспользованной. Отношение количества тепловой энергии, которое можно использовать для превращения ее в механическую, к общему количеству располагаемой тепловой энергии называется *коэффициентом полезного действия* (к.п.д.) процесса превращения энергии.

К.п.д. тепловых машин зависит в значительной степени от температур рабочего вещества. Обычно эффективный к.п.д. не превышает 30% (у паровоза даже 7%) и лишь у самых совершенных машин — дизелей 36—40%. Это значит, что больше половины тепловой энергии не используется и в переносном и в буквальном смысле вылетает в трубу. Ясно, что тепловая машина — устройство малоэффективное.

Много лет ученые пытаются повысить к.п.д. тепловых машин — совершенствуют их конструкции, увеличивают их мощность и т. д. Но повышение к.п.д. сверх 40% связано с большими трудностями. Поэтому заманчиво другое — полностью отказаться от тепловых машин и использовать химическую энергию окисления топлива, минуя промежуточное выделение тепловой энергии.

Возможность такого превращения подсказывает нам окружающая природа. Любой организм черпает необходимую энергию из органических видов топлива — пищевых продуктов. В организме происходит то же самое окисление топлива, что и в тепловой машине, образуются те же конечные продукты реакции — вода и углекислый газ. Но в машине окисление происходит с выделением тепловой энергии, с потерями тепла в окружающую среду на ее нагревание, а в организме энергия выделяется в основном в виде механической энергии мускульных сокращений, и температура окружающего пространства почти не повышается. Коэффициент преобразования энергии в живом организме достигает 60—70%. О таких показателях конструкторы тепловых машин даже и не мечтают.

Итак, химическая энергия может превращаться прямо в механическую. А прямо в электрическую?

Что такое электрохимия

Проблемой непосредственного превращения химической энергии в электрическую и электрической в химическую занимается электрохимия. Эта наука зародилась в начале XIX в. В наши дни она переживает свою вторую молодость.

Электрохимические реакции отличаются от обычных химических реакций тем, что в них участвуют свободные электроны. В ходе такой реакции свободные электроны либо выделяются, либо поглощаются. Примерами первых реакций могут служить реакции растворения металлов: $Zn \longrightarrow Zn^{2+} + 2e$— или реакции выделения кислорода на положительном электроде при электролизе воды:

$$4OH^- \longrightarrow 2H_2O + O_2 + 4e.$$

Реакции с отдачей электронов — *окислительные* (металлический цинк, отдавая электроны, окисляется до двухвалентного состояния). Пример *восстановительных реакций* — реакции отложения металлов из растворов, например: $Cu^{2+} + 2e \longrightarrow Cu$, или реакция электролитического выделения водорода:

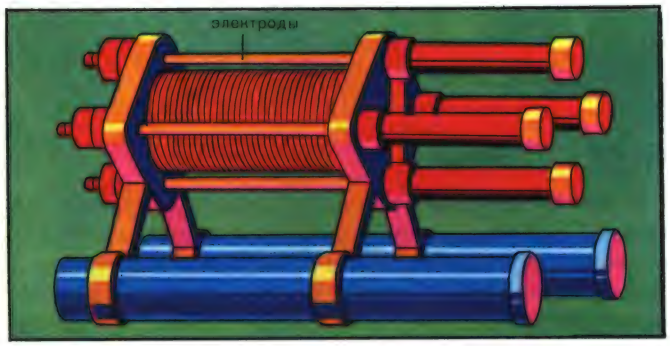
$$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2.$$

Электрохимические реакции протекают на поверхности металлических электродов, погруженных в раствор электролита. Электроны в обычных условиях не могут существовать в водном растворе в свободном состоянии, поэтому их и подводят к реагирующим веществам или отводят от них по электроду.

Электрохимические реакции очень важны в технике. В первой половине XIX в. почти единственными источниками электрического тока, с помощью которых делали многочисленные открытия в теории электричества, были *электрохимические источники тока*, или *гальванические элементы*.

Электрохимия в современной науке и технике

Во второй половине XIX в. электрохимические источники тока уступили место электромагнитным генераторам, более удобным для производства электроэнергии в больших масштабах. Но сама электрохимия продолжала развиваться. Появились большие электрохимические производства. С помощью



Батарея водородно-кислородных элементов. Мощность ее более 5 кВт. Диаметр каждого электрода 250 мм.

электролиза получали не только водород и кислород, хлор и щелочи, но и металлы — магний и алюминий, в которых нуждаются многие отрасли современной техники.

С помощью электрохимических методов при анализе химики обнаруживают различные вещества. Существуют электрохимические приборы, которые улавливают и регистрируют звуковые колебания, измеряют давление, ускорение, вибрации и другие разнообразные физические величины.

Но электрохимические реакции не всегда приносят пользу. Есть электрохимический процесс, который приводит к неисчислимым убыткам. Это коррозия металлов, уносящая каждый год десятую долю всего выплавляемого железа. Поэтому электрохимики изобретают средства как для ускорения электрохимических реакций, так и для их замедления.

Электрохимические реакции удобны тем, что их скорость можно регулировать довольно простыми способами. Это очень важно, когда имеешь дело с несколькими реакциями одновременно. Замедляя одни реакции и ускоряя другие, можно управлять процессами. Поэтому одним из важнейших разделов электрохимической теории стало учение о скорости электрохимических реакций, или электрохимическая кинетика. Эта теория начала развиваться в 30-е годы XX в. Исследование основных законов электрохимической кинетики позволило усовершенствовать важнейшие электрохимические процессы, в том числе и те, которые были присущи первым источникам тока — гальваническим элементам.

Энергетика большая и малая

Электрохимические источники тока к концу прошлого века почти полностью потеряли свое значение как источники электроэнергии. Они не могли конкурировать с промышленными электростанциями. И все же ученые вынуждены были вернуться к ним, заняться их изучением и совершенствованием. Этого требовала жизнь. Переносной радиоаппаратуре были нужны автономные (не связанные с электрической сетью) источники питания, надежные и удобные. В таких источниках нуждается транспорт — самолеты, автомобили, а теперь и космические корабли. В 30—40-е годы для этих целей были созданы десятки типов гальванических элементов и аккумуляторов, достаточно мощных и энергоемких.

Но как бы ни были совершенны гальванические элементы и аккумуляторы, конкурировать с электрогенераторами они не в силах, если можно воспользоваться электроэнергией от сети. Поэтому наметилось совершенно четкое деление способов выработки и потребления энергии: в так называемой большой энергетике электрическая энергия вырабатывается на электростанциях и распределяется по сетям к потребителю; в малой энергетике применяют автономные, малогабаритные, но и относительно маломощные источники электроэнергии для питания аппаратуры, которая не может быть присоединена к электросети. И в том и в другом случае электроэнергию получают за счет химической энергии окисления топлива. В электрохимических источниках тока превращение происходит прямо и непосредственно, с большим к.п.д. Тепловым электростанциям, как уже говорилось, свойственно многоступенчатое превращение энергии, к.п.д. их невысок. Создается парадоксальное положение: большая энергетика отдает предпочтение не простому и выгодному электрохимическому методу, а сложному и неэффективному многоступенчатому превращению.

Парадокс этот вызван прежде всего экономическими соображениями. В котельных тепловых электростанций сжигают дешевое природное топливо; в электрохимических же источниках тока издавна использовали такие экзотические (с экономической точки зрения) виды «топлива», как цинк, магний, свинец или в лучшем случае железо. Ясно, что никакой высокий к.п.д. не окупит расходов на такое «топливо». Кроме того, тепловая энергетика пользуется даровым окислителем — кислородом воздуха, а электрохимические источники тока требуют в качестве окислителей все ту же «экзотику», например двуокись марганца, а иногда даже окись серебра.

Второй существенный недостаток электрохимических элементов — прерывистость их действия. В элемент заложен определенный запас активных материалов («топлива» и «окислителя»), рассчитанный на выработку какого-то количества электрической энергии. Запас израсходован, и элемент надо заменять другим или перезаряжать. Тепловая же машина работает непрерывно, топливо и окислитель подводят к ней также непрерывно.

Как же преодолеть эти противоречия? Очевидно, надо подумать над тем, как применить электрохимический метод к обычному топливу и как сделать процесс непрерывным. Если бы все это удалось, расход топлива на производство электроэнергии сократился бы в полтора, а то и в два раза.

Топливные элементы

Вот уже почти столетие ученые многих стран ищут пути прямого преобразования химической энергии дешевого топлива в электрическую. Создать *топливные элементы* оказалось чрезвычайно трудно. Во-первых, обычное топливо так медленно поддавалось электрохимическому окислению, что о мало-мальски приемлемой мощности не могло быть и речи. Во-вторых, топливные элементы были чрезвычайно недолговечны. До середины текущего столетия создание надежных и эффективных топливных элементов многим казалось бесперспективным.

Но энтузиасты-исследователи продолжали развивать теоретические основы электрохимии, они искали новые материалы и новые катализаторы. Их исследования увенчались успехом. Ученые уверены: проблема будет решена, и решена сравнительно скоро. Подтверждение тому — новые образцы топливных элементов.

Как же они устроены? Топливный элемент существенно отличается от обычного гальванического элемента старого типа. Топливо и окислитель для электрохимической реакции не закладываются в него заранее, а непрерывно подводятся к нему во время работы. Для удобства компоненты подводят в газообразном или жидком состоянии. От тепловой машины топливный элемент отличается тем, что окисление происходит в нем не химическим путем (путем горения), а электрохимическим.

При обычном химическом окислении электроны с молекул топлива переходят на частицы окислителя. Если бы этот переход был упорядочен, т. е. совершался преимущественно в одном направлении, мы получили бы электрический ток. Но в пламени частицы топлива и окислителя перемешаны и электронный переход совершается хаотично, во всех направлениях. Энергия процесса рассеивается в виде тепла. Смысл *электрохимического окисления* как раз и заключается в *упорядочении электронных переходов*. Для этого прежде всего необходимо разделить частицы топлива и окислителя.

Рассмотрим простейшую электрохимическую реакцию окисления водорода кислородом. Водород подводится к электроду, выбранному так, чтобы на нем могла протекать реакция окисления водорода с образованием водородных ионов и электронов:

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e.$$

Другой электрод выбирается таким образом, чтобы на нем подаваемый кислород мог восстановиться в воду:

$$^1/_2O_2 + 2H^+ + 2e \longrightarrow H_2O.$$

Если соединить электроды металлическим проводником (электрической цепью), то реакции на обоих электродах все время будут протекать слева направо. Образующиеся на первом электроде электроны по внешней цепи переходят на второй электрод — по цепи течет электрический ток, который совершает работу. Электрическая цепь замыкается электролитом, в котором образующиеся ионы водорода также переносятся ко второму электроду.

Необходимая для работы электрическая энергия получается за счет энергии химического процесса. Суммарная химическая реакция, протекающая на обоих электродах,— реакция образования воды:

$$H_2 + {}^1/_2O_2 \longrightarrow H_2O.$$

Сложность создания топливных элементов заключается в подборе электродов (и электролита), которые были бы достаточно активны. Чтобы увеличить скорость электрохимических реакций, как и реакций химических, часто используют катализаторы. Катализаторы находятся на поверхности или в порах электродов.

Водородно-кислородный элемент

На рисунке (стр. 442) дана схема простейшего водородно-кислородного элемента. Основа элемента — два электрода, на которых происходят электрохимические реакции ионизации газов. Электроды имеют вид тонких пористых дисков. Их получают прессованием и спеканием металлических порошков, чаще всего никелевого. В электрод (либо в процессе изготовления, либо потом) введен катализатор. Электроды укрепляют в ячейке топливного элемента так, чтобы с одной стороны они соприкасались с раствором электролита. Края электродов тщательно герметизированы.

Через обратную сторону к электродам подают газы: к одному — водород, к другому — кислород. Газы нагнетают под слегка повышенным давлением, так что они частично вытесняют электролит из пор электродов. Таким образом внутри пористого электрода создаются участки контакта трех тел — твердого электрода, жидкого электролита и газообразного реагента (водорода или кислорода). Вблизи этих так называемых трехфазных границ раздела и происходит токообразующая электрохимическая реакция. От электродов ток по специальным токоотводам идет во внешнюю цепь.

Обычно в водородно-кислородных элементах электролитом служит сорокапроцентный раствор щелочи — КОН. Рабочая температура поддерживается в пределах 70—100° С.

Если внешняя цепь разомкнута, то электроны, естественно, не могут перейти с одного электрода на другой: после выделения некоторого количества электронов на водородном электроде и поглощения некоторого количества электронов на кислородном процесс прекращается. Между электродами устанавливается разность потенциалов, называемая *электродвижущей силой* (э.д.с.) или напряжением разомкнутого элемента. Для водородно-кислородных элементов напряжение при разомкнутой цепи равно 1,0—1,1 В, причем более отрицательным является водородный электрод (на нем электроны выделяются и частично накапливаются).

Замкнем внешнюю цепь, подключив к ней, например, лампочку. Через цепь пойдет ток. Возобновившиеся реакции ионизации газов поддержат его. Но во время прохождения тока электрическое напряжение элемента несколько снизится; чем больше будет сила тока, тем ниже напряжение. Практически допускают снижение напряжения до 0,7 В. Сила тока, при которой это напряжение достигается, считается *максимальной силой разрядного тока данного элемента.*

Максимальная сила разрядного тока элемента зависит прежде всего от размера площади поверхности электродов и от их каталитической активности. Для сравнения элементов разных размеров очень удобно рассчитать плотность электрического тока, представляющую собой отношение силы тока к площади поверхности электродов. Для водородно-кислородных элементов в зависимости от катализаторов и условий работы максимальная плотность тока может колебаться от 50 до 500 мА/см^2.

Для практического использования электрической энергии требуется, как правило, сравнительно высокое напряжение. Автомобильная аппаратура работает при напряжении 12 В, самолетная — 28 В. Чтобы получить такие напряжения, несколько элементов соединяют последовательно в батарею. На рисунке (стр. 439) показан общий вид батареи из 40 последовательно включенных элементов. Она может дать силу разрядного тока до 200 А при напряжении 28 В.

Высокотемпературные топливные элементы

Электрохимическое окисление топлива не всегда протекает гладко. Такие распространенные и дешевые виды топлива, как генераторный газ (основное содержание — окись углерода CO) или природный газ, состоящий главным образом из метана CH_4, реагируют на электродах значительно медленнее, чем водород. А малая скорость реакции означает малую плотность тока и, следовательно, малую мощность.

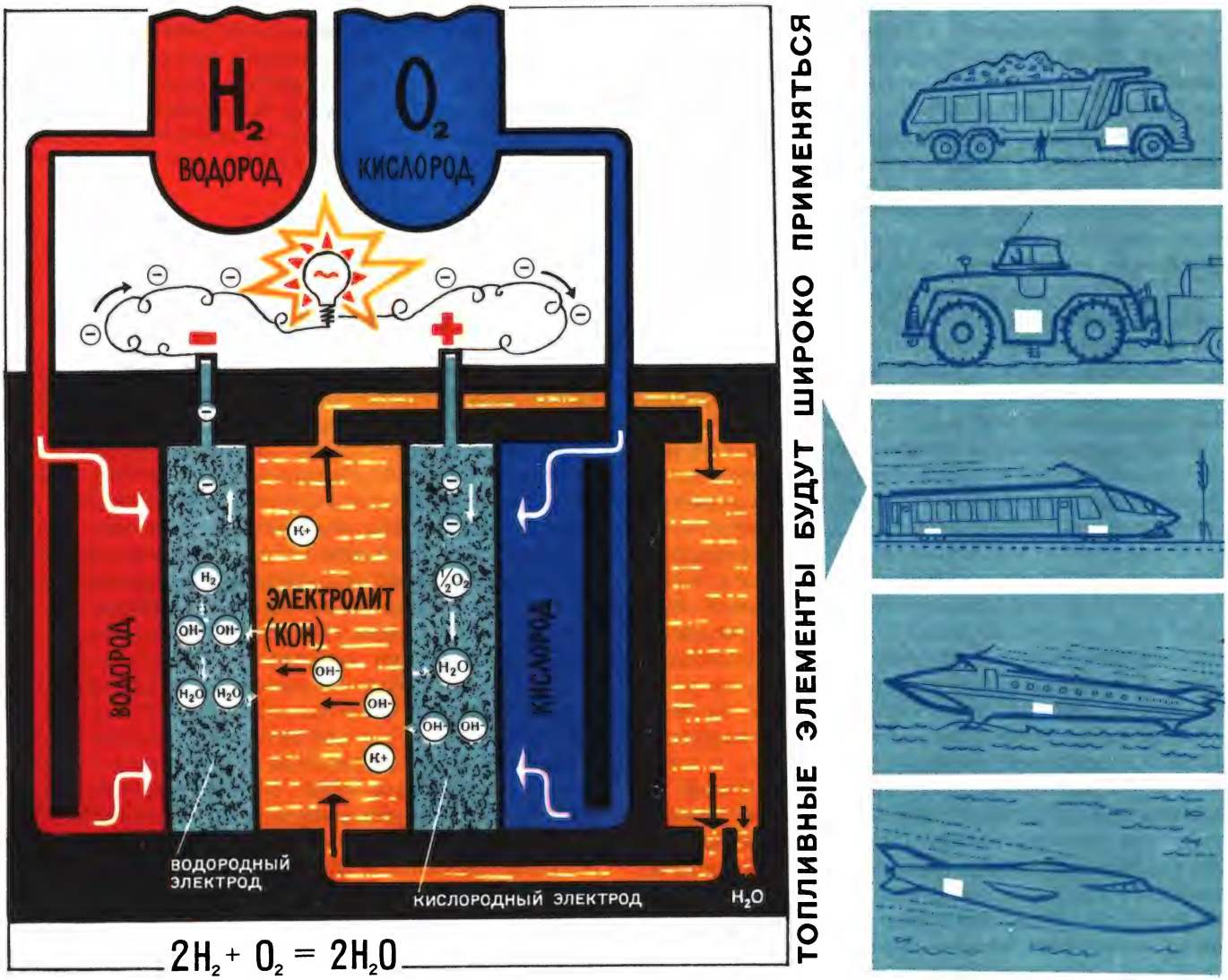
Эти реакции можно проводить с достаточной скоростью, если использовать высокие температуры, например 500 или даже 1000° С. Но тут возникает новая трудность: при высоких температурах водный раствор электролита оказывается неподходящим — вода испаряется мгновенно. Для таких температур электролитами могут служить либо расплавы солей (например, смесь углекислых солей натрия, калия и лития, плавящаяся при температуре чуть ниже 500° С), либо твердые электролиты.

Твердый электролит — двуокись циркония (ZrO_2) содержит некоторые примеси. При температуре около 800—1000° С двуокись циркония благодаря подвижности отрицательных ионов кислорода O^{2-} начинает хорошо проводить электрический ток (катионы Zr^{4+} не перемещаются и ток не переносят). Такая «кислородная» проводимость влияет на характер электрохимических реакций, протекающих на электродах. Если построить элемент такого типа — вместо раствора КОН взять в качестве электролита ZrO_2 — и подводить к одному электроду окись углерода, а ко второму — кислород, то при температуре около 1000° С молекулы кислорода на электроде станут принимать электроны из внешней цепи, превращаясь в отрицательные ионы: $O_2 + 4e \longrightarrow 2O^{2-}$, а молекулы CO топливного электрода соединятся с ионами O^{2-} из твердого электролита, образуя углекислый газ и отдавая электроны во внешнюю цепь:

$$2CO + 2O^{2-} \longrightarrow 2CO_2 + 4e.$$

Электрический ток во внешней цепи компенсируется движением ионов O^{2-} в твердом электролите.

Схема работы водородно-кислородного топливного элемента.



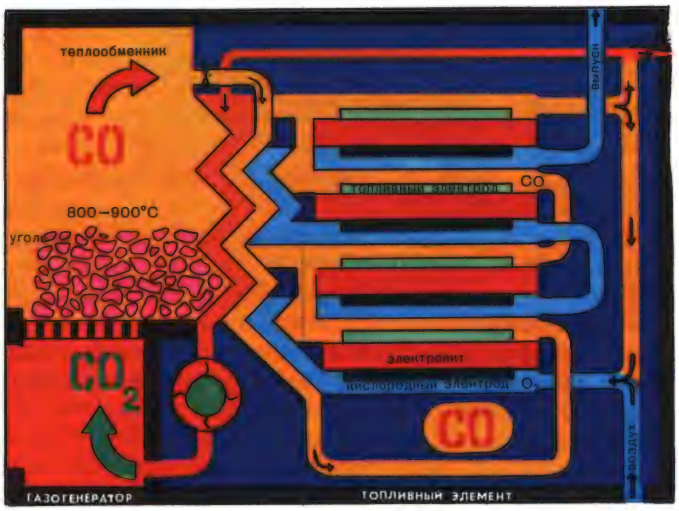
Такие высокотемпературные топливные элементы, питаемые генераторным газом и кислородом, могут работать при плотностях электрического тока 50—150 мА/см² напряжением около 0,5 В на элемент.

Топливные элементы дают ток

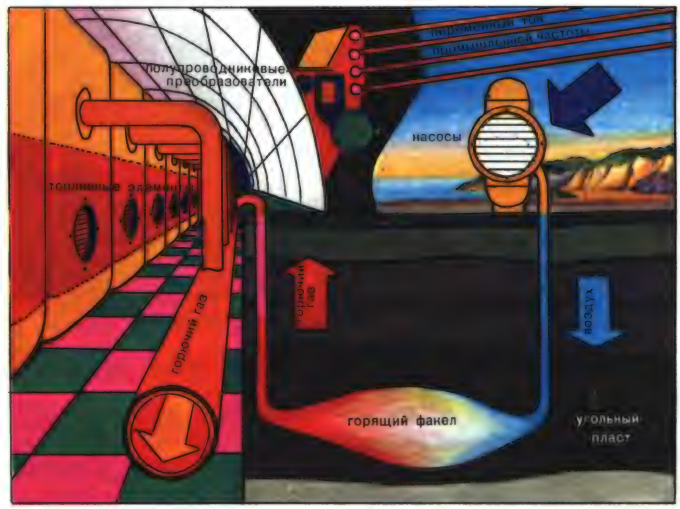
Топливные элементы выходят из лабораторий, но их необходимо еще совершенствовать, повышать стабильность и упрощать технологию изготовления. Принципиально решен главный вопрос непосредственного преобразования химической энергии топлива в электрическую. И в недалеком будущем различные типы топливных элементов найдут широкое применение в народном хозяйстве.

Конечно, заманчивее всего было бы создать на базе топливных элементов большие электростанции, вырабатывающие электрическую энергию из природного топлива или продуктов его переработки. Основой таких электростанций будут высокотемпературные топливные элементы с расплавленным или твердым электролитом. Топливом для элементов послужит либо природный, либо генераторный газ, получающийся при газификации твердого топлива. Твердое топливо при температуре около 700° С обрабатают углекислым газом, образуется окись углеро-

Топливо для работы высокотемпературного топливного элемента вырабатывается в газогенераторе.



Электростанция будущего работает на продуктах подземной газификации.



Уже построено немало опытных моделей электрических автомобилей. Некоторые электромобили развивают скорость до 90 км/ч.

Такому автомобилю не нужна заправочная станция: аккумуляторы заряжаются от любой электророзетки.

да. Окись углерода поступит в топливный элемент, где окислится в углекислый газ: $2CO + O_2 \longrightarrow 2CO_2$.

Электростанция будет состоять из большого количества совершенно одинаковых элементов, что значительно упростит ее строительство. На станции почти совсем не будет движущихся и вращающихся механизмов. Постоянный ток поступит к полупроводникам преобразователя, вырабатывающим почти без потерь переменный ток промышленной частоты.

Чтобы осуществить это, потребуется еще время, но несомненно, что когда-нибудь невыгодный процесс химического сжигания топлива будет заменен электрохимическим «холодным горением».

Топливные элементы найдут применение также в малой энергетике, и при этом раньше, чем в большой. В сельских районах перестанут стучать многочисленные дизели. Они уступят место бесшумным электрохимическим установкам.

Очень интересна перспектива использования топливных элементов в автомобилях. Автомобили с электрическими двигателями, питаемыми от топливных элементов, не будут отравлять воздух городов вредными выхлопными газами.

Топливные элементы стали незаменимыми источниками электрической энергии на искусственных спутниках Земли и космических кораблях. В 1965 г., во время полета американского космического корабля «Джемини», ток, вырабатываемый топливными элементами, использовался для всех внутренних нужд корабля: для освещения, работы многочисленной аппаратуры управления и контроля за полетом. Если бы для этой цели использовали обычные гальванические элементы или аккумуляторы, то масса этих приборов превысила бы массу всего космического корабля.

Сделана попытка использовать топливные элементы и для передвижения подводных лодок. Такая лодка проектировалась, к примеру, в Швеции. Важное преимущество топливных элементов по сравнению с дизельными двигателями — полная бесшумность их работы. Подводная лодка сможет незамеченной проходить через любую прослушиваемую зону. Она будет значительно дольше плавать под водой, чем лодка, снабженная аккумуляторами. Самые различные топливные элементы, которые создает электрохимия, помогут преобразить многие отрасли техники.

Замечательные явления на границе между телами

Молекулы-пограничники

Свойства всех веществ зависят от состава и строения их молекул. Свойства тел, для которых вещество служит как бы сырьем, кроме того, зависят и от *расположения молекул*, от *расстояний* между ними, а следовательно, и от их взаимодействия — *молекулярного сцепления*. В одних телах молекулы находятся друг от друга далеко, а в других — совсем рядом, и мы различаем в одном случае газы, а в другом — жидкости и твердые тела.

Во всех телах молекулы находятся в беспорядочном тепловом движении, которое замирает лишь при температуре абсолютного нуля — на 273° С ниже точки плавления льда. В газах (парах) молекулы беспорядочно движутся по прямым, сталкиваясь друг с другом или со стенками сосуда, в жидкостях — ползают, как пчелы в рое, а в кристаллах — беспорядочно колеблются вокруг узлов решетки — правильной пространственной сетки, лишь иногда перемещаясь на короткие расстояния.

Тепловое движение приводит к диффузии, к выравниванию концентрации частичек вещества, т. е. их числа в каждой единице объема тела. Чем выше температура, тем быстрее диффузия. В жидкостях диффузия идет медленнее, чем в газах, а в твердых телах при обычных температурах она почти незаметна.

Неправильно считать, что молекулы, занимающие весь объем тела, в равной мере определяют его свойства. Особенно важную роль, прежде всего при взаимодействии соприкасающихся тел или тела с окружающей его средой, играют *молекулы-пограничники*. Они занимают поверхности раздела, или, вернее, тонкие *поверхностные слои* на границах тел. Молекулы в этих слоях ведут себя иначе, чем в объеме тела.

От особых свойств поверхностных слоев зависят все виды молекулярного взаимодействия тел: прилипание, сваривание, паяние, склеивание, трение. Даже разрушение твердого тела, т. е. преодоление молекулярного сцепления внешними силами, надо рассматривать как образование новых поверхностей — явление, обратное свариванию двух кусков тела. Свойства поверхностных слоев определяют скорости таких процессов, как растворение и кристаллизация, испарение и конденсация пара, коррозия, или химическое растворение твердых тел (металлов) окружающей средой, разрушение горных пород и почв — эрозия.

Если твердое тело размолоть в мельчайшие пылинки, поверхность каждой единицы его объема увеличится в десятки тысяч раз. При этом возрастет и химическая активность. Свойства таких дисперсных тел станут целиком определяться свойствами их поверхностного слоя.

Каждая молекула в объеме любого тела связана со своими соседями, равномерно окружающими ее со всех сторон. Иное дело молекулы-пограничники: со стороны объема жидкости или твердого тела у них такие же соседи, так же плотно расположенные, а извне либо их очень мало, если тело граничит с газом (собственным паром), либо это чужие молекулы, принадлежащие другому телу. Поэтому молекулы-пограничники всегда обладают свободными связями — избытком свободной энергии, они активированы — вооружены избытком энергии.

Поверхностная энергия

Попробуем увеличить площадь поверхности тела, сохранив его объем. Растянем, например, пленку жидкости. Упругого растяжения, как у резины, не произойдет, расстояние между молекулами не увеличится. Просто все новые и новые молекулы будут переходить из объема жидкости на ее поверхность, образуя поверхностный слой толщиной в молекулу — *мономолекулярный слой*.

Представим себе молекулы плотно упакованными в поверхностном слое в виде одинаковых кубиков. Размер молекулы, т. е. ребро кубика (b), составляет около 0,3—0,5 нм (нанометра). Следовательно, площадь, занятая молекулой (b^2), $\approx$0,1—0,25 нм^2, а число молекул на 1 м^2 слоя ($n_1 = 1/b^2$) — около 10^{19}.

На каждую молекулу слоя действует сила f, направленная внутрь жидкости, и, чтобы вывести молекулу на поверхность, надо затратить работу, приблизительно равную произведению силы f на путь b. Работа, которая затрачена на образование единицы площади (например, 1 м^2) поверхностного слоя, или *поверхностное натяжение*, выразится так:

$$\sigma = fbn_1 = \frac{f}{b}. \qquad (1)$$

Эта величина определяет избыток свободной энергии, сосредоточенный в каждой единице площади — в квадратном метре или квадратном сантиметре слоя на границе двух любых тел. Эта энергия называется свободной, потому что ее можно использовать для совершения механической работы; подобную же энергию приобретает груз, поднятый на определенную высоту.

Рис. 1. В аквариуме плавает гусь. Гидрофобная оболочка перьев не смачивается, и вода не проникает в оперение, образуется воздушная подушка, на которой птица плавает, лишь немного погрузившись в воду. Добавим в аквариум активного смачивателя, совершенно безвредного для птицы. Гусь почувствовал себя необычно — его оперение намокает, он отяжелел, он тонет!

Так активируются молекулы-пограничники. Поверхностное натяжение иначе можно назвать удельной свободной поверхностной энергией. Его можно рассматривать как энергию активации всех n_1 молекул в единице площади (1 м^2) слоя. На одну молекулу эта энергия составляет $\frac{\sigma}{n_1} = fb = \sigma b^2$. Если площадь поверхности тела S м^2, то свободная поверхностная энергия равна σS. У дисперсных тел с сильно развитой поверхностью эта энергия может быть очень велика.

Сравним измеренные значения σ в мДж/м^2 (миллиджоулях на квадратный метр) при 20° С на поверхностях раздела некоторых жидкостей с собственным паром. У углеводорода гептана C_7H_{16} $\sigma = 20$, у воды $\sigma = 73$, у ртути $\sigma = 480$ мДж/м^2. Недаром насыщенные (предельные) углеводороды называют парафинами (в переводе с латинского — «обладающие малым сродством»). И силы сцепления между их молекулами весьма малы. Однако наименьшими межмолекулярными силами обладают перфторированные углеводороды, у которых все атомы водорода в молекулах заменены атомами фтора: C_7F_{16} вместо C_7H_{16}. Тогда σ становится наименьшим: $\sigma = 10$. Для большинства металлов σ вблизи точки плавления лежит между 500 и 2000 мДж/м^2. У малолетучих тел поверхностное натяжение на границе с воздухом характеризует молекулярные силы сцепления. Из уравнения (1) $f = \sigma b$, считая $\sigma = 500$ мДж/м^2, а $b = 4 \cdot 10^{-10}$ м, находим $f = 0{,}2 \cdot 10^{-9}$ Н. Эта сила очень мала — она соответствует весу около двух стотысячных долей миллиграмма! Но помножьте ее на все число молекул n_1 — и вы получите идеальную, т. е. наибольшую, прочность твердого тела на разрыв:

$$P_m = fn_1 = \frac{f}{b^2} \approx 10^9 \text{ Па (1ГПа)}.$$

Стержень из такого материала площадью сечения 1 см^2 выдержит груз весом 100 кН (килоньютонов).

Капли на поверхности. Смачивание. Форма жидких тел

Если каплю жидкости поместить на гладкую сухую поверхность, например на стеклянную пластинку, то она либо полностью растечется, покрыв пластинку пленкой, либо останется на месте. В первом случае произойдет полное *смачивание*: силы сцепления жидкости с твердым телом на их общей границе, т. е. силы прилипания, превысят сцепление молекул самой жидкости; во втором — силы прилипания окажутся меньше сил сцепления молекул жидкости и капля не растечется, полного смачивания не будет. Капля останется на пластинке, образуя с ней краевой угол; чем он больше, тем хуже смачивание. Если краевой угол тупой, как, например, у ртути на стекле или у воды на парафине, капля свободно бегает по пластинке, не оставляя на ней следа. Поверхность, образующую тупой краевой угол с каплей воды, называют *гидрофобной* (в переводе с греческого — «ненавидящая воду») или водоотталкивающей. Строго говоря, это неправильно, так как сама вода не отталкивается, а притягивается к любым поверхностям, но силы прилипания к гидрофобным поверхностям так малы, что не могут преодолеть силы сцепления между молекулами воды в капле (рис. 1).

Чем больше поверхностное натяжение жидкости на границе с ее паром, тем хуже она смачивает твердую поверхность. Углеводородные жидкости — нефть и минеральные масла ($\sigma = 20$—30) смачивают все сухие твердые поверхности, вода ($\sigma = 73$) не смачивает жирные (гидрофобные) поверхности, а ртуть ($\sigma = 480$) не смачивает *все* обычные поверхности.

Чем сильнее молекулярное взаимодействие жидкости с каким-либо телом, чем она сильнее прилипает к нему, тем лучше она его и смачивает. Оттого-то ртуть и другие жидкие (расплавленные) металлы

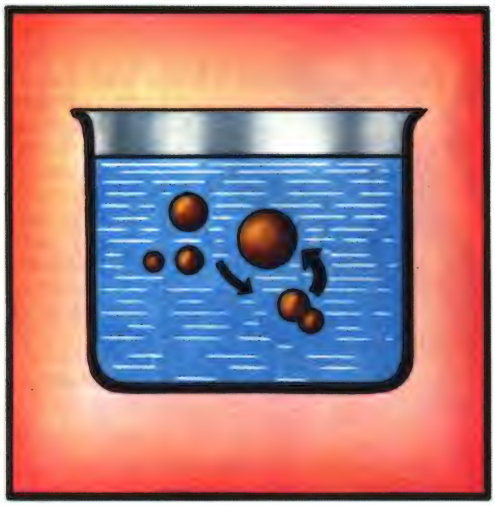


Рис. 2. Если большую каплю масла поместить в не смешивающуюся с ним жидкость равной плотности, например смесь воды со спиртом, то, по закону Архимеда, капля масла станет невесомой. Такая капля принимает форму шара. Отдельные капельки масла сливаются в одну большую.

прекрасно смачивают металл, очищенный от окисла, но не смачивают ни стекло, ни поверхность твердых металлов, покрытую на воздухе окисленной пленкой. Этим свойством широко пользуются при паянии и лужении; перед тем как сварить или спаять металлы, их очищают от окислов. В отличие от гидрофобных *гидрофильные* поверхности (в переводе с греческого — «любящие воду») хорошо смачиваются водой. С поверхностями кварца и силикатных стекол вода вступает даже в химическое соединение, образуя слои гидрата двуокиси кремния — кремниевой кислоты.

Сами по себе, или, как говорят, самопроизвольно, происходят те процессы, при которых уменьшается свободная энергия. Именно поэтому самопроизвольно, под действием молекулярных сил, капля жидкости принимает форму шара: площадь ее поверхности становится наименьшей при постоянном объеме. Это легко заметить, наблюдая за маленькими каплями воды на несмачиваемой поверхности парафина или за каплями ртути на стекле. У крупных капель форма шара искажается силой тяжести, но, если большую каплю масла поместить в не смешивающуюся с ним жидкость равной плотности, например в смесь воды со спиртом, она, по закону Архимеда, станет невесомой, и тогда капля примет форму шара (рис. 2). Это и есть собственная форма жидких тел; она легко возникает, но так же легко искажается под действием внешних сил.

Соприкасаясь, капельки сливаются в одну большую каплю, что тоже вызвано уменьшением свободной поверхностной энергии — уменьшением площади поверхности при постоянстве объема. Число молекул-пограничников при этом всегда уменьшается; они возвращаются в объем жидкости.

Адсорбция

Поверхностный слой может улавливать из окружающей среды такие молекулы, которые способны «насытить» свободные силы сцепления молекул-пограничников. Эти силы связывают молекулы слоя с уловленными молекулами. При этом поверхностная энергия уменьшается без изменения площади поверхности. Такой процесс называется *адсорбцией*. Вещества, молекулы которых связываются с поверхностью, называются *поверхностноактивными веществами*.

Адсорбцию используют для очистки газов и жидкостей от примесей и вредных веществ, для извлечения из растворов ценных продуктов, например соединений редких металлов. Вещества улавливаются на поверхности адсорбентов — тонкопористых тел, пронизанных мельчайшими открытыми каналами. Таковы специально приготовленные активные угли, или силикагели; их получают обезвоживанием студней кремнекислоты. Поверхность одного грамма таких высокодисперсных адсорбентов достигает 1000 м^2! Адсорбенты применяют и как катализаторы — ускорители химических реакций. Молекулы

Может ли сталь плавать на воде!

Закон Архимеда дает ясный ответ: сталь тяжелее равного объема воды почти в 8 раз — она обязательно должна утонуть, упасть на дно. Однако потрем сухую иглу между пальцами и осторожно положим ее на поверхность чистой воды в тарелке. Класть надо горизонтально. Для этого можно положить иголку сначала на кусочек промокашки, а затем на воду. Бумажка промокнет и потонет, а игла будет плавать. Ее удерживает поверхностное натяжение воды. Если подлить в воду концентрированный раствор смачивателя (мыла), понижающего поверхностное натяжение воды, игла вскоре намокнет и потонет.

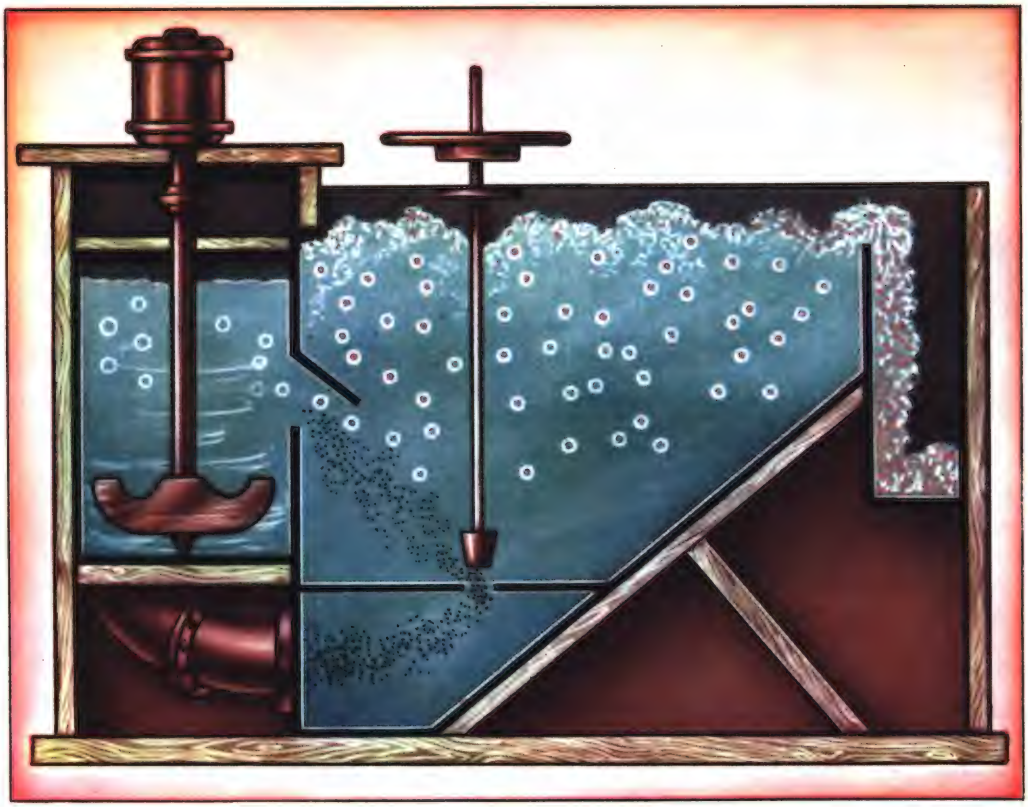


Рис. 3. Схема флотационной машины. *Справа* — пузырек воздуха, выносящий прилипшие к нему частицы ценного минерала.

веществ, активируясь на поверхности в порах адсорбента, легче реагируют друг с другом, и скорость реакции повышается во много раз. Именно так действуют катализаторы при получении аммиака, серной кислоты и в других важнейших химических производствах.

Главная роль поверхностноактивных веществ в том, что они сильнейшим образом изменяют свойства поверхности тел и условия взаимодействия этих тел. Для этого требуется очень мало поверхностноактивного вещества — столько, чтобы покрыть поверхность адсорбента слоем в одну молекулу. При самой плотной упаковке молекула этого слоя занимает площадку в виде квадратика со стороной около 0,45 нм (нанометра). Следовательно, площадь, занимаемая молекулой, равна $(0{,}45 \cdot 10^{-9})^2 м^2 \approx 0{,}2 \cdot 10^{-18} м^2$. Значит, на 1 $м^2$ приходится $\frac{1}{0{,}2 \cdot 10^{-18}} = 5 \cdot 10^{18}$ молекул. Но известно, что моль любого вещества содержит $6 \cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро); таким образом, на 1 $м^2$ приходится около 10^{-5} моля вещества. Если молекулярная масса этого вещества около 300, то, чтобы покрыть 1 $м^2$ поверхности мономолекулярным слоем, потребуется около 3 мг поверхностноактивного вещества.

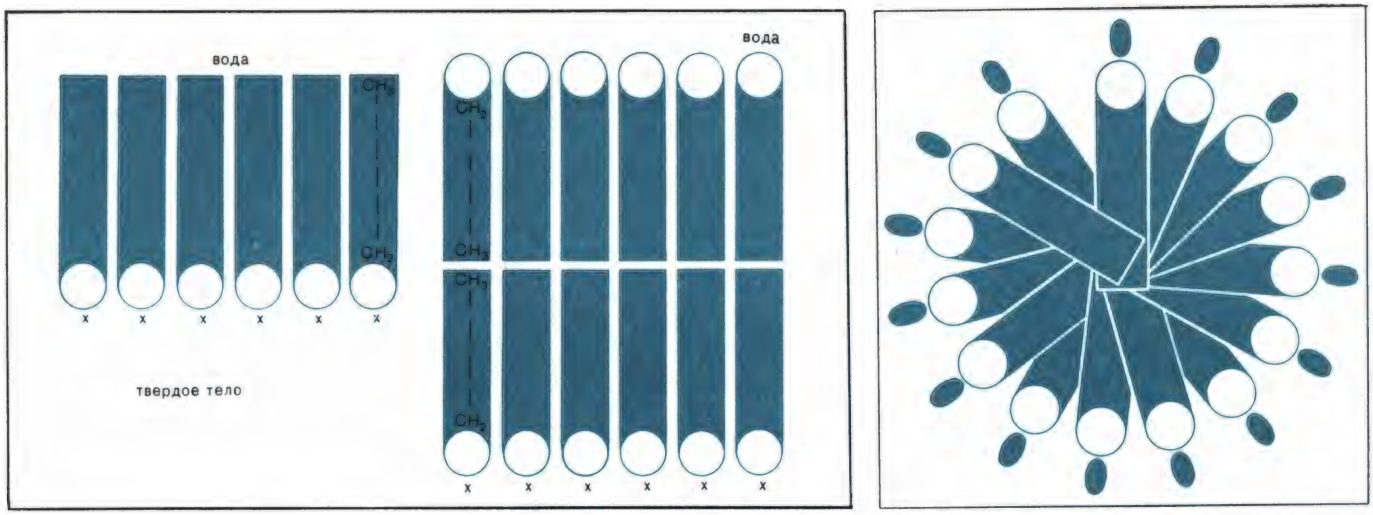
Свойства адсорбционных слоев помогают управлять технологическими процессами: отмывать загрязнения с любых материалов, приготовлять устойчивые суспензии и эмульсии или, наоборот, быстро их разрушать, делать поверхности смачиваемыми или не смачиваемыми водой. С помощью поверхностноактивных веществ разработали метод флотации — обогащение полезных ископаемых, т. е. отделение их частиц от пустой породы (рис. 3). Частицы ценного минерала, сделавшись благодаря тончайшему адсорбционному слою несмачиваемыми, при перемешивании в воде прилипают к пузырькам воздуха и выносятся ими наверх, в пену, а хорошо смачиваемые частицы породы остаются в воде и оседают на дно. Флотационные процессы помогают добывать свинец, цинк, медь, золото, платину, обогащать фосфориты, серу, уголь, железную руду, использовать самые бедные руды, которые прежде невыгодно было разрабатывать. Во всем мире на огромных флотационных фабриках обогащаются ежегодно миллионы тонн рудных и нерудных ископаемых.

С помощью поверхностноактивных веществ можно делать несмачиваемыми ткани и волокна. Они остаются пористыми, пропускают пары, «дышат», но не впитывают и не пропускают воду.

Как построены молекулы поверхностноактивных веществ

Молекулы поверхностноактивных веществ состоят из двух частей, связанных химическими силами, но с противоположными свойствами: из гидрофильной полярной группы (гидроксильной, карбоксильной или аминогруппы) и гидрофобной длинной неполяр-

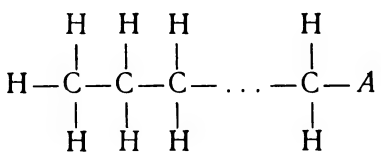
Рис. 4. Ориентация молекул поверхностноактивного вещества при адсорбции на твердом теле *(слева)*. Строение мицелл мыла: шарообразных — *справа*, пластинчатых — *в центре*. Белыми кружками показаны полярные группы, голубыми — молекулы воды, крестиками — атомы поверхности твердого тела.



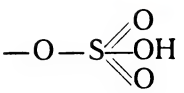
ной углеводородной цепи. Полярная группа — источник сил притяжения. Углеводородная же цепь слабо притягивает другие молекулы. Недаром предельные углеводороды назвали парафинами. Молекулы притягиваются своими полярными группами к твердым поверхностям, а углеводородные цепи этих молекул торчат наружу, покрывая их поверхность гидрофобной пленкой (рис. 4).

Растворите в воде капельку поверхностноактивного вещества — спирта или жирной кислоты. На поверхности раствора образуется молекулярный адсорбционный слой. Гидрофильные полярные группы останутся в воде, углеводородные же цепи из-за сильного притяжения молекул воды друг к другу будут выталкиваться ими на поверхность. Чем длиннее углеводородная цепь, тем активнее адсорбируется вещество, тем сильнее оно понижает поверхностное натяжение воды — у чистой воды с 73 до 27 мДж/м^2 (приближается к поверхностному натяжению чистого углеводорода 20 мДж/м^2).

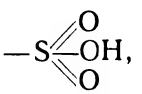
Самыми эффективными и универсальными поверхностноактивными веществами оказываются *моющие (мылообразные) вещества*. Углеводородная цепь их молекул состоит не менее чем из 11 звеньев:



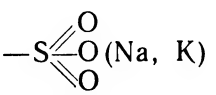
и «уравновешена» сильногидрофильной полярной группой A, которая сама по себе резко повышает растворимость вещества в воде. Такой группой может быть остаток серной кислоты

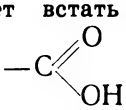


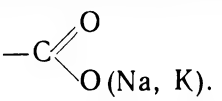
или сульфогруппа



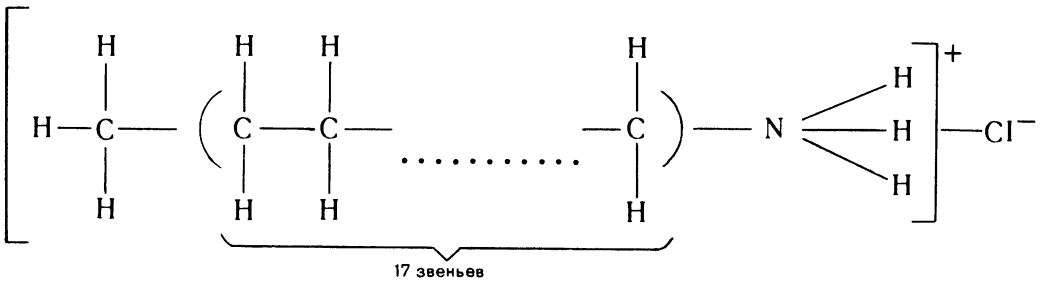
в которых ион водорода может замещаться ионом натрия или калия:



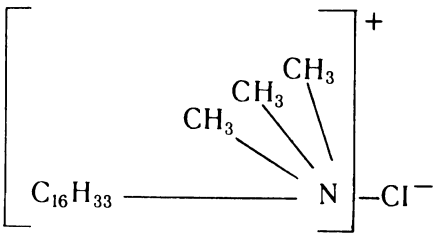
На место группы A может встать карбоксильная группа жирных кислот:  , в которой водород замещен щелочным металлом (Na, K):



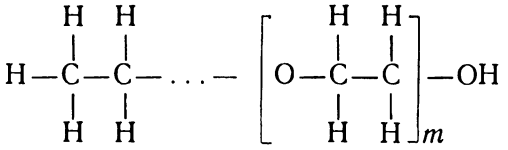
Щелочные соли высших жирных кислот и называются *собственно мылами*. Мылообразные вещества растворимы в воде и обладают высокой поверхностной активностью. Образуя адсорбционные слои, они сильно понижают поверхностное натяжение воды. Вещества эти анионактивны, так как углеводородная цепь — источник поверхностной активности — входит у них в состав отрицательного иона — *аниона*, а положительным ионом *(катионом)* служит ион водорода или щелочного металла. В катионактивных веществах углеводородная цепь входит в состав поверхностноактивного катиона, а анионом служит, например, ион хлора. Такова хлористоводородная соль октадециламина:



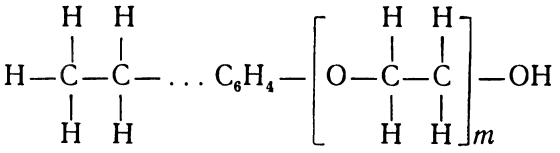
или хлористая соль четырехзамещенного (триметил-, гексадецил-) аммония:



Поверхностноактивные вещества могут быть и неионными, тогда они растворяются в воде в виде молекул. Чтобы они были подобны мылу, их полярная группа должна обладать высокой гидрофильностью. К таким веществам принадлежат алкиловые или алкилфенольные эфиры полиэтиленгликоля. Гидрофильная группа у них — полимеризованная окись этилена $(C_2H_4O)_m$, где m изменяется от 4 до 20:



или



Почему мыла моют

Мылообразные поверхностноактивные вещества образуют в воде коллоидные растворы: при определенной концентрации несколько десятков молекул или ионов мыла объединяются в агрегаты — *мицеллы* (рис. 4). Мицеллы имеют шарообразную форму с гидрофильной оболочкой из полярных групп и гидрофобным ядром из углеводородных цепей. С ростом концентрации мицеллы становятся пластинчатыми — прослойки из углеводородных цепей покрыты с обеих сторон полярными группами. Такие пластинчатые мицеллы являются зародышами кристалликов мыла. Пластинчатые мицеллы сцепляются углеводородными цепями крайних молекул в пространственные сетки-каркасы, и раствор, как говорят, *структурируется* — приобретает свойство упругого твердого тела, напоминающего желе и называемого *гелем*.

Поверхности, покрытые такими мицеллярными адсорбционными слоями в растворах мыл, всегда хорошо смачиваются водой. Этому помогает сильно пониженное поверхностное натяжение воды на границе с воздухом. Именно поэтому одно и то же вещество может в очень малой концентрации делать твердую поверхность гидрофобной, в большей концентрации давать прямо противоположный результат — смачивать водой любую гидрофобную поверхность (рис. 5).

Но мыла не только смачиватели; они и сильные стабилизаторы, обеспечивающие устойчивость жидких пленок (вспомним знакомые всем мыльные пузыри) — пен, а также всех дисперсных систем — *эмульсий* и *суспензий*. В эмульсиях мелкие капель-

Как выдувать мыльные пузыри

Растворите в 100 г теплой дистиллированной или долго кипевшей воды 2 г тонко наструганного сухого детского мыла и 10 г чистого глицерина. После охлаждения к раствору добавьте понемногу крепкого нашатырного спирта, пока раствор не станет прозрачным и не будет сильно пахнуть аммиаком. Затем небольшую стеклянную вороночку, к которой присоединена резиновая трубочка, погрузите раструбом в мыльный раствор. Крупные пузыри хорошо выдувать на блюдце с раствором, смочив им края блюдца. Выдувая пузырь, понаблюдайте, как с уменьшением толщины пленки на ней играют все более и более яркие интерференционные цвета.

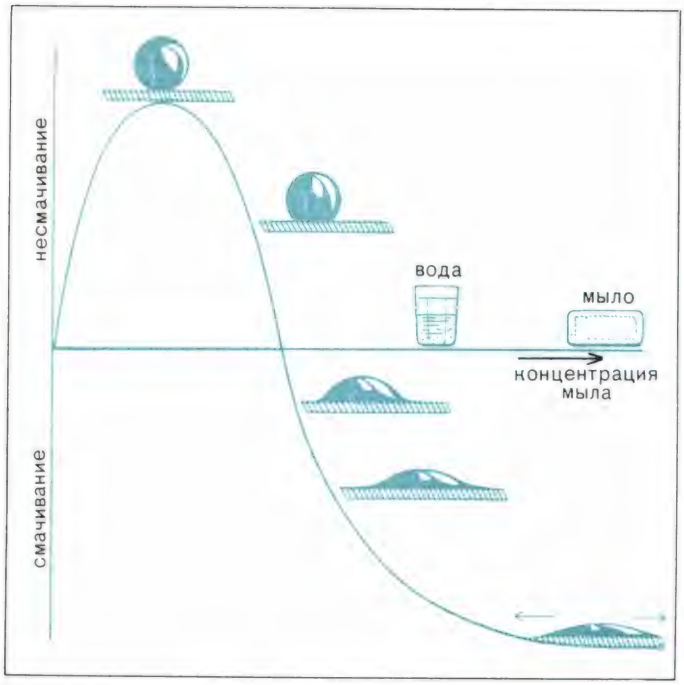


Рис. 5. Влияние адсорбции мыла на смачивание водой твердых поверхностей.

ки одной жидкости, не смешиваясь, распределяются в другой жидкости. Под действием поверхностной энергии они при соприкосновении стремятся слиться друг с другом. Подобно этому сцепляются в агрегаты и частицы твердого тела, образующие суспензию в жидкой среде. Стабилизатор же создает на поверхности капелек эмульсии или частиц суспензии гелеобразный (структурированный) адсорбционный слой, который препятствует сближению и взаимодействию частиц.

Нальем в стеклянный сосуд (бутылку) воду и, встряхивая, будем понемногу добавлять туда керосин или бензин. Капельки бензина тотчас же начнут сливаться в крупные капли, и смесь разделится на два жидких слоя. Теперь повторим опыт, добавив к воде 1—5% мыла. При встряхивании образуется молочно-белая устойчивая эмульсия, в которой отдельные капельки, не превышающие сотой доли миллиметра, защищены от слияния адсорбционными оболочками мыла.

Водный раствор мыла занимает двадцатую часть сосуда, но его хватает на эмульгирование в 20 раз большего объема бензина, если вводить бензин постепенно, малыми порциями, каждый раз энергично встряхивая. Весь бензин разобьется на мельчайшие капельки, плотно прижатые друг к другу, но устойчиво разделенные тонкими прослойками мыльного раствора. Такие концентрированные эмульсии очень вязки, они напоминают сметану. Кстати, и сметана, и сливки, и молоко — это эмульсии жира в воде, стабилизованные белковым веществом.

Попробуем разрезать кончиком стеклянной палочки слой ртути толщиной 2—3 мм, покрывающий дно плоской чашечки или блюдца под водой (рис. 6). Такой разрез сделать нельзя: он тотчас же «залечивается» — смыкается под действием поверхностного натяжения на границе ртуть — вода. Однако, если к воде добавить 1% сапонина — экстракта из мыльного корня, разрез стабилизируется структурированными адсорбционными слоями. Они примут форму, соответствующую минимуму свободной энергии, которую можно рассчитать математически. Разрез должен кончаться у краев слоя ртути или замыкаться на себя, образуя кружок — кольцо. В одной точке могут пересекаться только три разреза, образуя равные углы в 120°.

Время жизни таких разрезов возрастает по мере насыщения адсорбционного слоя и характеризует стабилизирующую способность данного поверхностноактивного вещества.

Так почему же мыло моет, почему оно легко отмывает с любой поверхности грязь — сажу, масло, нефть? Именно потому, что оно обладает *смачивающей* и *стабилизирующей способностью*. Мыло переводит всю грязь в воду в виде тонкодисперсных суспензий и эмульсий.

Обычное мыло — натриевые соли жирных кислот — без труда справляется с грязью в мягкой воде, в которой нет солей кальция и магния. В жесткой же воде мыло осаждается в виде нерастворимых кальциевых и магниевых мыл, раствор теряет свою моющую способность. Однако химики создали синтетические мылообразные (моющие) вещества, пригодные для любой воды, даже для морской; особенно хороши неионные мыла, совершенно устойчивые к действию солей.

Моющие средства и смачиватели используются в быту, в промышленности и в сельском хозяйстве. Смачиватели применяют при изготовлении фотокинопленки, когда прозрачную полимерную ленту надо равномерно полить светочувствительным составом — высокодисперсной взвесью бромистого серебра на водном растворе желатины. Смачиватель, добавленный в ванну, где окрашивают волокно и ткань, ускоряет процесс и делает окрашивание равномерным. Чтобы избавить шахтеров от вредной пыли, в шахтах распыляют воду с добавкой смачивателя. Пыль улавливается такой водой, и воздух становится чище. Полное смачивание — необходимое условие для взаимодействия жидкости с твердым телом, для проникновения жидкости в тонкие поры. Поэтому-то все ядохимикаты и гербициды, применяемые в сельском хозяйстве, содержат поверхностноактивные вещества.

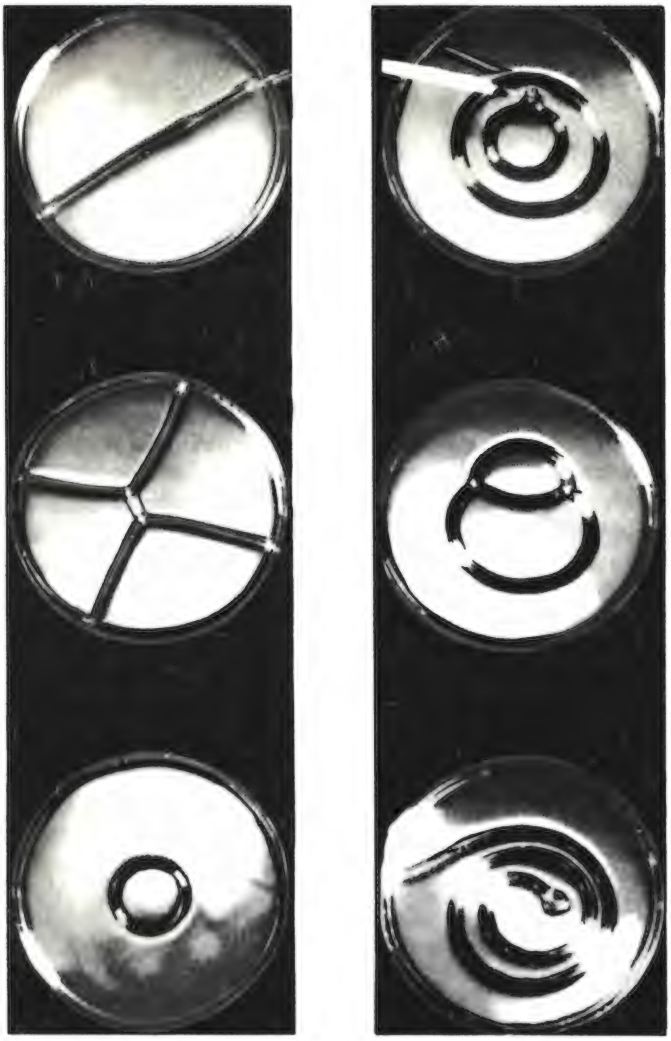


Рис. 6. Формы разрезов слоя ртути, стабилизованных поверхностноактивным веществом.

Пены полезные и вредные

Мылообразные вещества вызывают образование устойчивой обильной пены, в которой пленки разделяют мелкие пузырьки воздуха или другого газа.

Если загорится нефть или бензин, пожар можно потушить только устойчивой пеной. Ее получают, вспенивая водный раствор поверхностноактивного вещества-стабилизатора углекислым газом. Устойчивую пену применяют и в производстве легких и достаточно прочных теплоизоляционных материалов — пенобетонов, пенопластиков, пенорезин. В пленках такой пены отвердевает цемент или образуется полимер, и пена становится твердой. Вспененный материал в сотни раз легче массивного. Если масса 1 м^3 литого пластика равна 1 т, то масса 1 м^3 того же пенопласта — всего 10 кг. Нет нужды доказывать, насколько удобен и полезен такой материал.

Но кроме полезных пен есть и вредные. Тем, кто готовит пищевые продукты или лекарства, нередко устойчивая пена очень мешает. Пена может даже затопить цех. Тогда в ход идут пеногасители — вещества, понижающие поверхностное натяжение сильнее, чем вспениватели. Пеногаситель, например октиловый спирт, вытесняет из поверхностного слоя адсорбированный стабилизатор, но сам структурированного слоя образовать не может, и пена разрушается.

На этом основано и химическое деэмульгирование — разрушение устойчивых эмульсий малыми добавками очень активных веществ. Деэмульгаторы, как и пеногасители, хотя и образуют пены и эмульсии, но очень неустойчивые — они «живут» всего несколько минут.

Нефть, добываемая из недр земли, почти всегда содержит воду в виде мелких капелек в устойчиво эмульгированном состоянии. Вода сильно засолена — часто это насыщенный раствор природных солей, так как соляные пласты, «купола», сопровождают нефтяные месторождения. Чтобы не возить и не обрабатывать эту воду, чтобы она не подвергала коррозии ценную аппаратуру для перегонки нефти, эмульсию нужно разрушить. Сто граммов деэмульгатора на тонну нефти — и эмульсия расслаивается, в нефти почти не остается воды.

От производства полимеров до книгопечатания

Углеводороды практически нерастворимы в воде, но хорошо растворимы в водном растворе мыла: они поглощаются ядрами мицелл. Это явление называется *солюбилизацией* или *коллоидной растворимостью* и играет важную роль в производстве полимеров. Молекулы мономера — первичного вещества, из которого получается полимер, — при эмульгировании в водном растворе мыла переходят из капелек в ядра мицелл, где идет полимеризация. Образуется латекс — высокодисперсная взвесь частиц полимера, напоминающая сливки. Полимеризация в эмульсиях очень удобна для изготовления пленочных изделий: в латекс макают металлический цилиндр, и, после того как вода испарится, на нем образуется сплошная пленка из слившихся друг с другом частиц полимера.

Поглощая жидкий углеводород, керосин или гептан, пластинчатые мицеллы мыла разбухают, становятся круглыми и больше не могут сцепляться в

каркас. Даже концентрированные растворы мыл — гели — при этом разжижаются, превращаясь в текучие жидкости, их вязкость понижается в сотни тысяч раз. Так можно управлять образованием пространственных структур в дисперсных системах — их превращают в твердые тела или в легко текучие жидкости. С помощью мыл можно загущать, или, как говорят в технике, «отверждать», жидкое горючее — керосин, бензин или спирт. Таким горючим пользуются полярники, геологи, туристы.

Человеческие потребности разнообразны. Нам необходимо научиться отмывать грязь, но не менее важно наносить ее на чистую поверхность. Что такое печатание книг и иллюстраций, как не нанесение на бумагу устойчивых загрязнений? Процесс печатания можно рассматривать как сложный комплекс тонко управляемых поверхностных явлений. В литографии на поверхность гладкого камня — известняка — или металлическую печатную форму наносят жирной краской рисунок. Краска содержит поверхностноактивные вещества (обычно жирные кислоты). Благодаря им одни участки формы смачиваются краской, но не смачиваются водой, а другие после обработки водным раствором гидрофильного поверхностноактивного вещества (крахмала, декстрина, поливинилового спирта) во влажном состоянии не воспринимают краску и становятся пробельными местами. В этом процессе очень важно сделать резкую границу между двумя такими участками и сохранить ее надолго, чтобы с одной формы получить много оттисков.

Поверхностноактивные вещества — наши незаметные и незаменимые друзья. Они помогают нам управлять поверхностными процессами, которые имеют решающее значение во взаимодействии различных тел — твердых, жидких и газообразных. Не думайте, что поверхностные явления и процессы характерны только для техники, не менее важны они и в природе. Вот быстро бежит по зеркалу пруда водомерка — ее лапки не смачиваются водой. По той же причине прилипает к поверхности воды и не тонет личинка малярийного комара. Чтобы избавить

Что прочнее — сухой или влажный слой песка!

Сухой песок сыпуч и бессвязен — из него нельзя формовать детские «куличики» или строить домики. Вспомним, как трудно пешеходу или велосипедисту передвигаться по сухому прибрежному песку. Но стоит немного смочить песок водой, как он становится пластичным, а вылепленные из него сооружения достаточно прочными. По такому песку легко ходить и ездить на велосипеде. Если с помощью рюмки сформовать из влажного песка конус, он осыплется, когда полностью высохнет или в том случае, когда он под водой. Это показывает, что вязкость влажного песка вызвана смачивающими мостиками — менисками воды, которые стягивают зерна песка. Эти же мениски стягивают волоски шерсти мокрой собаки. Мостики исчезают и при удалении влаги, и при заполнении водой пустот между зернами.

Иное дело с глиной. Если замешать ее с водой как густое тесто, а потом высушивать, то чем меньше в ней останется воды, тем прочнее будет отформованное изделие — в тысячи раз прочнее «кулича» из влажного песка. Частицы глины гораздо меньше, чем зерна песка, и они связаны непосредственно молекулярным сцеплением по относительно большим площадкам прямого соприкосновения. Тонкие прослойки воды только раздвигают частицы глины и понижают прочность структуры.

Прочность грунтов, на которых строят здания, зависит от содержания в них песка и глины. Этой прочностью можно управлять, изменяя условия на поверхностях раздела во влажном грунте.

окрестность от малярии, надо покрыть пруд тончайшей нефтяной пленкой.

Капли росы и дождя не смачивают восковую поверхность листьев, а потому не закрывают поры, и растения дышат свободно. Силы смачивания помогают влаге подниматься по стеблям и стволам растений. И наоборот, благодаря тому что плазма крови не смачивает стенки самых тонких капиллярных сосудов, облегчается кровообращение, кровь не свертывается. Образование и рассеивание тумана и облаков — все это поверхностные явления. Мелкие зародышевые капельки же растут за счет конденсации пара и слияния друг с другом — идет дождь. Это связано с проявлениями поверхностной энергии.

Но если множество процессов в природе, в организмах растений и животных вызвано особыми свой-

Как самому ставить опыты с мономолекулярными слоями

В белую тарелку или стеклянную ванночку, вымытую горячей водой и розовым раствором марганцовокислого калия, наливают чистую воду так, чтобы она переливалась через край. Это обеспечит чистоту поверхности воды, на ней не будет мономолекулярных слоев активных загрязнений. Затем поверхность воды припудривают тальком и касаются ее поверхности стеклянной палочкой, смоченной в олеиновой кислоте. Слой талька раскалывается и уплотняется мономолекулярным слоем олеиновой кислоты. Удача опыта и служит проверкой чистоты поверхности.

Второй опыт. На чистую поверхность воды насыпают немного мелких кристалликов камфары или паратолуидина, которые тотчас же начинают носиться по поверхности в бешеном танце: поверхностноактивные молекулы разбегаются, отрываясь от самых активных мест кристалликов, а те испытывают реактивные толчки в разных направлениях. Такое адсорбционное движение можно сделать и направленным. Из алюминиевой фольги вырезают подобие плоской ракеты — реактивного кораблика с прорезом в хвосте. Кораблик плавает на воде, удерживаясь силами поверхностного натяжения (вследствие несмачивания). Затем пинцетом в прорез осторожно помещается кристаллик поверхностноактивного вещества (камфары). Поток молекул вырывается струйкой из прореза, стремясь покрыть всю поверхность мономолекулярным слоем. Кораблик движется вперед под действием реакции струи и быстро вращается вдоль краев сосуда. И танец кристалликов, и движение кораблика можно тотчас прекратить, коснувшись поверхности воды палочкой, смоченной олеиновой кислотой. Кислота гораздо активнее, и ее мономолекулярный слой равномерно покрывает всю поверхность воды, вытесняя адсорбционные слои камфары или других веществ и понижая еще сильнее поверхностное натяжение.

Опыт вытеснения адсорбционного слоя можно сделать еще более эффективным, нанеся на чистую поверхность воды несколько мельчайших крупинок анилинового красителя — кристаллического фиолетового. Поверхностноактивный краситель растворяется прежде всего в поверхностном слое, окрашивая его в фиолетовый цвет. Ничтожные количества олеиновой кислоты, как говорят химики, ее следы, не обнаруживаемые никакими методами, кроме радиохимического, немедленно вытесняют слой красителя. Поверхность становится бесцветной, а окрашенные слои воды уходят в объем.

Рис. 7. Чем мельче осколки твердого тела, тем они прочнее.

ствами поверхностей, то не научится ли человек управлять ими так же, как сейчас он управляет подобными процессами в технике? На этот вопрос можно дать утвердительный ответ. Физико-химия поверхностных явлений и дисперсных систем — наука быстро развивающаяся, и от нее надо ожидать очень много нового и ценного.

Путь к прочности — через разрушение

Странно звучит, не правда ли? Всем известно, что прочность — это сопротивление твердого тела разрушению. И все-таки, как это ни парадоксально, путь к самой высокой прочности идет через разрушение твердого тела — через его превращение в мельчайшие крупинки. Чтобы понять это удивительное противоречие, выясним, что такое реальные твердые тела и чем они отличаются от идеальных. В кристаллах расстояния между молекулами, атомами или ионами в среднем очень малы и правильные ряды этих частичек образуют пространственную решетку. В жидкостях такого порядка в расположении молекул нет, хотя и здесь молекулы расположены очень плотно. Стекла — вязкие жидкости, они практически не текут и могут быть прочными и упругими, как кристаллы, хотя и лишены правильной структуры.

Но беспорядочное тепловое движение молекул образует и в кристаллах, и в стеклах изъяны, или дефекты,— места с меньшей плотностью упаковки молекул и с увеличенными расстояниями между ними. Такие дефекты плотной структуры — слабые места с пониженной прочностью. Они-то и есть причина того, что прочность реальных твердых тел в несколько сотен раз ниже, чем прочность идеальных кристаллов и стекол. У идеального твердого тела тот же состав и строение, что и в реальном теле, но в его правильной или просто плотной структуре нет слабых мест, изъянов.

Разрушение любого реального твердого тела — процесс постепенного раскрытия сначала наиболее слабых мест, а затем все менее и менее опасных дефектов. Представим себе, что тело образовано сеткой переплетенных стальных цепей, в которых на каждые 100 стальных звеньев приходится в среднем по одному бумажному звену. Ясно, что под нагрузкой в такой конструкции будут разрываться бумажные звенья, стальные же останутся нетронутыми. В обрывках сетки будет оставаться все меньше и меньше бумажных звеньев, наконец останутся только стальные. Такие обрывки цепей из стальных звеньев — маленькие осколки твердого тела — будут очень прочны, в них уже почти совсем не встретишь изъянов.

Теперь вам понятен парадокс: измельчение твердого тела — путь к его упрочнению. Легко сообразить, что крупинки твердого тела станут особенно прочными, близкими к идеальной, т. е. наибольшей, прочности, когда их размер приближается к среднему расстоянию между дефектами в структуре (рис. 7). Современные методы структурного анализа показывают, что в среднем один дефект — зародыш разрушения — приходится в твердом теле на несколько сотен нормальных расстояний между центрами молекул. Это нормальное расстояние равно десятимиллионным долям миллиметра. Значит, среднее расстояние между дефектами — десятые доли микрометра (около 10^{-7} м). И действительно, тонкое измельчение твердых тел в обычных мельницах, постепенно замедляясь, прекращается вовсе, когда размеры крупинок достигают микрометра или долей микрометра. В таких крупинках уже почти нет изъянов, они становятся очень прочными.

Но ведь нам нужны не отдельные, пусть даже сверхпрочные крупинки, а прочное тело большого размера. Устранив бумажные звенья, мы должны теперь соединить обрывки стальных цепей, т. е. склеить или сварить крупинки друг с другом. Это можно сделать, например, связав их тончайшими прослойками другого мелкокристаллического или стекловидного материала. Если эти прослойки будут очень тонкими, они окажутся упрочненными по тем же причинам.

Измельчение путем разрушения не единственный путь к высокой прочности. Самое главное — получить мелкозернистое (высокодисперсное) твердое тело. Прийти к этому можно и другим путем. В расплавленном металле или в другой жидкости, охлажденной ниже температуры плавления, создают условия для быстрого образования множества зародышей будущего твердого тела. Затвердевая, жидкость превращается в прочный сросток мельчайших беспорядочно расположенных кристалликов. Такие же кристаллики нового твердого тела могут образоваться и в старом теле после термомеханической обработки, в которой сочетаются нагрев, охлаждение и пласти-

ческая деформация. Таким же путем можно закристаллизовать и стекла. Так получают *ситаллы*, в которых мельчайшие кристаллики связаны тонкими прослойками твердого, но незакристаллизовавшегося стекла.

Но возвратимся к разрушению твердого тела, к его превращению в мельчайшие крупинки. После того как предел измельчения достигнут, упрочненные крупинки начинают сцепляться друг с другом в прочные рыхлые агрегаты. Дальнейшее разрушение прекращается — идет обратный процесс. И тут нас снова выручают поверхностноактивные вещества. Их добавки облегчают разрушение твердого тела, помогают развитию в нем дефектов. Это явление называется *адсорбционным понижением прочности*, оно было открыто и исследовано советскими учеными.

Когда тело разрушается, у него образуются новые поверхности. Работа, идущая на их образование, и есть свободная поверхностная энергия. Возьмите толстую резиновую трубку и надрежьте ее в нескольких местах поперек на разную глубину. Растяните трубку. Вы увидите, как в местах надрезов развиваются новые поверхности (рис. 8). Отпустите трубку, и надрезы благодаря упругости (эластичности) резины сомкнутся. Если же трубку растянуть до предела, она разорвется по самому глубокому надрезу. В этом месте развивался самый опасный дефект — зародыш разрушения. Работа, идущая на развитие трещины, определяется поверхностной энергией, которая и понижается в присутствии поверхностноактивных веществ. Если за время развития трещины адсорбционный слой успеет распространиться по новой поверхности и покрыть ее, работа образования трещины и сопротивление тела разрушению понизятся. Это хорошо видно у металлов, которые в обычных условиях пластичны. Пластинка из такого металла (например, цинка) деформируется пластично — обнаруживает большие остаточные деформации, не разрушаясь при изгибе. Здесь сильнодействующими поверхностноактивными веществами служат тоже металлы, только легкоплавкие и в жидком состоянии: для стали — олово, для цинка — ртуть или галлий (белый металл, плавящийся при температуре около 30° С). Поцарапайте немного цинковую пластинку и нанесите на обнажаемую поверхность (свободную от окисной пленки) капельку ртути. Если попытаться изогнуть пластинку, она даст трещину, а при медленном надавливании сломается, как стекло, даже не изогнувшись. Твердое тело из пластического стало хрупким, так как поверхностноактивное вещество облегчило развитие новой поверхности (рис. 9).

Невозможно растереть цинк в порошок без добавки ртути или галлия. Добавки поверхностноактивного вещества нужны для тонкого измельчения и всех других тел. Вся вновь возникающая поверхность тел должна по мере ее образования покрываться мономолекулярным адсорбционным слоем. Для обычного кварцевого песка, например, сильно поверхностноактивным веществом оказывается простая вода: ее добавка к сухому песку позволяет тонко помолоть кварц; образующиеся при этом мельчайшие песчинки не слипаются в агрегаты.

Мы видим, что и образование частиц нового тела при кристаллизации, и процесс разрушения (измельчения) твердых тел определяются поверхностными явлениями. И в том и в другом случае образованием таких малых, а потому и прочных крупинок твердого тела можно управлять с помощью адсорбционных слоев. Они облегчают развитие дефектов — зародышей разрушения — и могут задержать дальнейший рост мельчайших кристалликов. Такие кристаллики-зародыши могут плотно срастаться иногда с тонкими, а потому и высокопрочными прослойками между ними. Именно так и образуются новые сплавы, сохраняющие свою прочность до очень высокой температуры 3000° С. Прочность таких металлов на растяжение достигает 2—3 ГПа.

Чтобы разорвать проволоку из такого металла диаметром 1 мм, т. е. площадью поперечного сечения около 0,8 мм^2, надо подвесить к ней груз массой 200 кг.

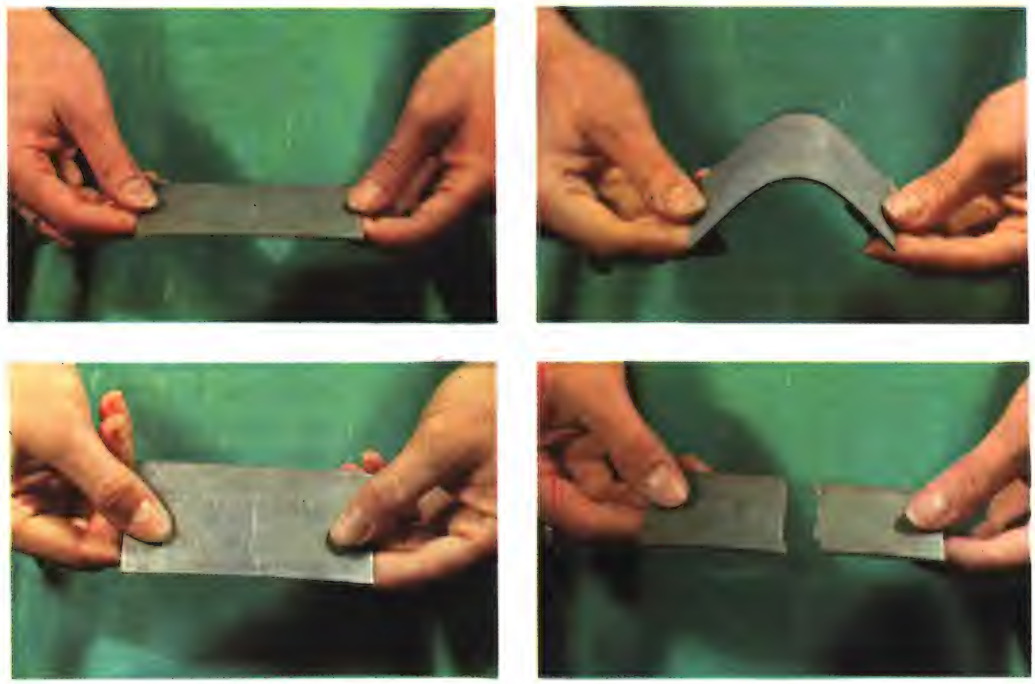
Однако, как мы уже знаем, даже такая огромная прочность значительно ниже идеальной. Чтобы приблизиться к идеальной прочности, надо постараться (с участием поверхностноактивных веществ!) раскрыть все изъяны в крупинках-кристалликах, а затем сварить или плотно склеить эти крупинки.

Равномерно перемешать мельчайшие крупинки, а затем предельно плотно их упаковать — вот главная задача *порошковой металлургии*, а также технологии тонкой жаропрочной керамики, огнеупоров и металлокерамики. Тугоплавкие твердые тела могут быть сформованы без плавления и литья. Они формуются из тонких порошков с небольшим количеством связующего, роль которого часто играет поверхностноактивное вещество. Отформованное изделие спекается при температуре хотя и высокой, но не достигающей точки плавления. *Спекание — поверхностное явление*, подобное слиянию двух капель ртути в одну,— происходит благодаря уменьшению поверхностной энергии. В твердых телах ему способствует диффузия, скорость которой растет с повышением температуры.

Уплотнить мелкозернистый порошок не так-то просто. Для этого нужна огромная и дорогая прессовая аппаратура, развивающая высокие давления. Но

Рис. 8.

Рис. 9.



и в таких прессах хорошо уплотняются только пластичные зерна, например зерна мягких металлов, которые как бы текут под давлением и заполняют все пустоты. Зерна же твердых, тугоплавких и хрупких материалов не текут и лишь немного (упруго) деформируются. В спрессованном материале возникают огромные внутренние (упругие) напряжения. Когда давление снимают, эти внутренние напряжения разрывают изделие иногда еще до спекания: возникает растрескивание, появляется брак.

Новая отрасль науки — физико-химическая механика решает задачу, как управлять дисперсной структурой и свойствами будущего материала в самом процессе его образования. Физико-химическая механика предлагает эффективный и дешевый способ: все связи между крупинками разрушаются интенсивной вибрацией с частотой около 10 тыс. колебаний в минуту. Снова путь к прочности через разрушение! И дело вовсе не в том, чтобы просто подвергнуть порошок вибрированию,— вибрационные воздействия применяют в технике давным-давно. Важно знать, какой должна быть вибрация, чтобы смешение было однородным, упаковка наиболее плотной, а следовательно, и конечная прочность материала максимально высокой. Нужно, чтобы подвижность смеси стала наибольшей, т. е. разрушились бы все молекулярные связи между крупинками.

Вы, конечно, догадываетесь, что и тут дело не обходится без поверхностноактивных веществ, обволакивающих каждую крупинку тончайшим смазочным слоем. Эти замечательные вещества в сочетании с предельным вибрированием и позволяют обойтись без громоздких прессов. Теперь давление для наиболее плотной упаковки требуется в сотни раз меньшее. Крупинки порошка укладываются плотно (рис. 10), внутренних напряжений не возникает, и изделие после спекания получается очень прочным.

Изменяя размеры зерен порошка, можно создавать высокопрочные тела с различной пористостью вроде фильтров, или поглотителей, или катализаторов в виде таблеток или гранул. Катализаторы — дисперсные тела с сильно развитой поверхностью пор, на которой в адсорбционных слоях быстро протекают химические реакции. Современной химической технологии как раз и нужны прочные катализаторы, выдерживающие интенсивные газовые потоки.

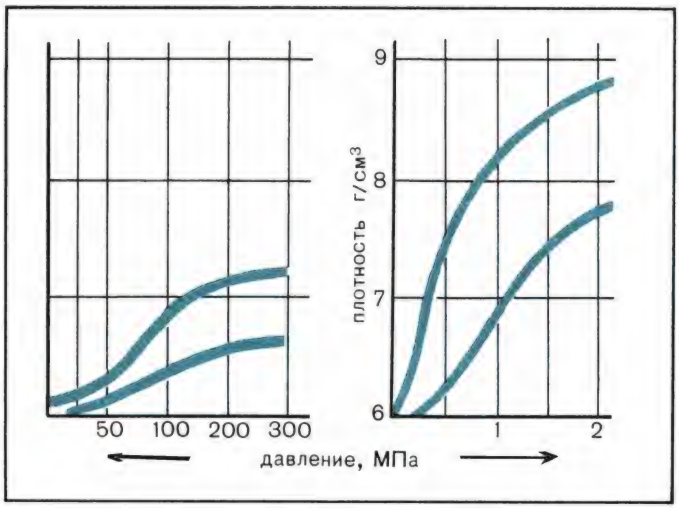


Рис. 10. Прессование порошков: *слева* — без вибрации; *справа* — под действием вибрации. Нижняя кривая — без смазки; верхняя — с активной смазкой.

Самый распространенный строительный материал — цементный бетон. Частицы тонкомолотого цемента при перемешивании с водой, песком и щебнем постепенно растворяются в воде, и из раствора выкристаллизовываются гораздо менее растворимые в воде гидратные новообразования — химические соединения цемента с водой. Кристаллики этих соединений срастаются друг с другом и с поверхностью песчинок, щебня и стальной арматуры, объединяя всю массу в затвердевший монолит. Все это, казалось бы, несложно. Но беда в том, что для бетона требуется крупный песок и щебень, а того и другого не так уж много, да и бетон получается очень плохого качества — рыхлый, непрочный, впитывает и пропускает воду, а потом не выдерживает мороза.

Применение же методов физико-химической механики позволяет использовать в бетоне дешевый мелкозернистый песок, обходиться без дорогого щебня и получать очень плотный, однородный, а следовательно, и прочный, быстро твердеющий бетон. Выгода от этого при наших масштабах строительства огромна. Новый бетон, плотный и звонкий, как металл, не боится ни влаги, ни мороза, ни химически агрессивных жидкостей. Детали и конструкции из него более легкие, изящные и долговечные.

Изучение поверхностных явлений ведет к заветной цели современной науки о материалах — к получению *материалов с заданными свойствами*. Этим и занимается физико-химическая механика, возникшая на стыке технологии с физической и коллоидной химией, молекулярной физикой твердого тела и механикой материалов. Химия должна решать сегодня две основные задачи: с одной стороны, синтезировать новые вещества или извлекать уже известные вещества из природных источников и, с другой стороны, перерабатывать вещества в разнообразнейшие твердые тела (технические материалы и изделия), в строительные материалы для зданий, в детали машин, в волокна, ткани, пленки и т. д. Без решения второй задачи первая не принесет пользы: можно получить новое вещество и не найти способ, как его применять, т. е. не суметь превратить его в материал, а именно материалы — основа технического прогресса. Физико-химическая механика вручает сегодня технологам простые и универсальные методы для решения этой второй задачи, помогая рождению новых материалов.

Органические вещества вокруг нас

Сколько их?

Органических веществ в настоящее время известно около 3 млн. Каждый год синтезируют или открывают в природе свыше 100 тыс. новых органических соединений, и число таких открытий непрерывно растет.

В 1882 г. был издан справочник по органической химии, который составил русский академик Федор Федорович Бейльштейн. В двух больших томах этого справочника содержались сведения обо всех известных тогда органических веществах. В наши дни в ФРГ продолжает выходить издание этого справочника. Выпущено уже более ста таких томов, а информация по органическим веществам дана только до 1949 г. Теперь уже ясно, что количество сведений о новых органических веществах возрастает так стремительно, что включить все в справочную литературу становится все труднее. Химики-органики первыми предложили использовать электронные вычислительные машины для «запоминания» справочных данных. Сейчас такие машины уже используют для научной справочной службы.

Новые органические вещества рождаются в научных лабораториях; главная масса их так и не выходит из лабораторий. Однако способы получения многих веществ передаются на фабрики и заводы. Одни вещества, как, например, органическое азотное удобрение карбамид, производятся на заводах в миллионах тонн, другие — совсем в небольших количест-

вах — десятки или сотни килограммов в год. Все органические вещества нужны, и их можно встретить всюду: на заводах и в колхозах, в больницах и на стадионах, в жилых домах и в палатках полярников, в библиотеках и в обсерваториях...

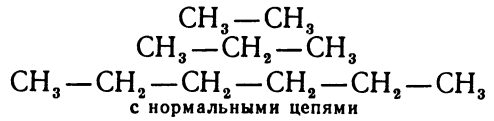
Почему их так много?

Органические вещества — это разнообразные соединения углерода с другими элементами, и прежде всего с водородом, кислородом, азотом, фосфором. Многообразие органических веществ — следствие особых свойств углерода, что и выделяет его среди всех других элементов периодической системы Менделеева. Углерод находится в четвертой группе периодической системы; во внешней электронной оболочке атома углерода четыре электрона, поэтому углерод четырехвалентен и легко образует прочные химические соединения как с элементами, легко отдающими свои валентные электроны (водород), так и с элементами, легко принимающими электроны в свою внешнюю валентную сферу (кислород или хлор).

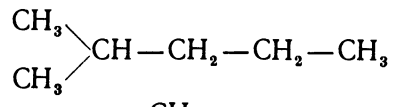
Но одно это свойство не могло бы обеспечить все многообразие органических веществ, если бы не способность углерода соединяться с самим собой и создавать таким образом цепи атомов. Эти цепи могут быть короткими — из двух, трех, четырех атомов, но могут быть и очень длинными — 100 000 атомов и больше. Например, молекулы некоторых видов полиэтилена содержат в среднем в цепи около 150 000 атомов углерода. Вещества с очень длинными цепями атомов называются *полимерами* (см. ст. «Полимеры»).

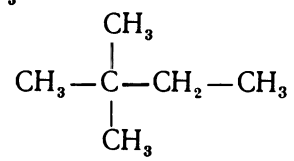
Цепи атомов углерода могут быть линейными (нормальными), в которых все атомы, соединенные в цепочку, расположены подряд, но могут быть и разветвленными; они могут образовывать кольца, сетки, разнообразные пространственные фигуры. Цепи составляются не только из атомов углерода, в них могут включаться в разных местах атомы других элементов — кислорода, азота, серы. Разнообразие цепей, которое можно составить из атомов углерода и других элементов, поистине безгранично.

Однако это еще не все! Мы говорили только о цепях из атомов углерода, пусть с включением атомов других элементов. Но ведь при образовании цепи атом углерода использует только две свои валентности, а их у него четыре (лишь в местах разветвления цепей углерод использует три или даже все четыре валентности). В линейной цепи у каждого атома углерода остаются еще две валентности, а у атомов, расположенных с краю цепи, даже три валентности, которые могут быть использованы для соединения с атомами других элементов, прежде всего с атомами водорода. Тогда получаются разнообразные *углеводороды:*

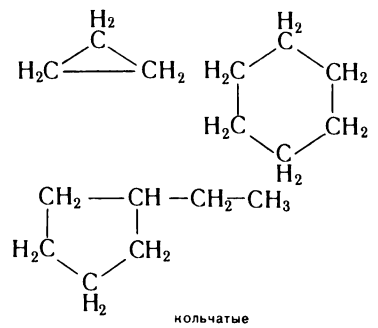


с нормальными цепями

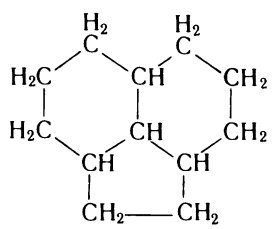


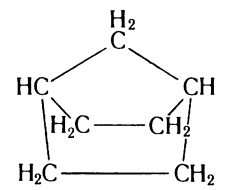


с разветвленными цепями



кольчатые



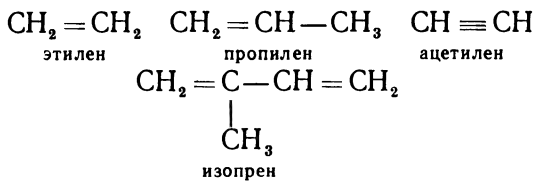


многокольчатые

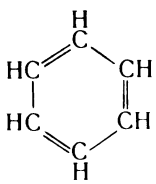
Вместо атомов водорода в различных местах цепей могут быть также атомы кислорода, азота, серы... Получаются разнообразные кислородные, азотистые, сернистые производные углеводородов. Та-

ким образом, великое разнообразие цепей углеводородов, т. е. цепей из атомов углерода, обрамленных атомами водорода, еще умножается на великое разнообразие производных, которые различаются характером атомов, замещающих водород, и их расположением в цепи.

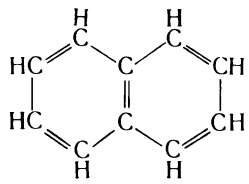
И это еще не все причины разнообразия органических веществ! Атомы углерода могут соединяться друг с другом не одной, а двумя или тремя валентностями. Тогда между ними возникают двойные и тройные связи:



Эти связи могут быть расположены в различных местах цепей или колец. В некоторых случаях образуются особенно прочные группы атомов, как, например, в бензоле, где шесть атомов углерода связаны 18 валентностями, образуя шесть так называемых *ароматических связей* (название «ароматический» сложилось исторически, так как некоторые представители этого класса соединений имеют приятный запах). Остальные шесть валентностей атомов углерода соединены с водородом. Часто (но неточно) бензол изображают с тремя простыми и тремя двойными связями между атомами углерода:



бензол



нафталин

Наконец, разнообразие органических веществ увеличивается еще и оттого, что они могут различаться пространственным расположением атомов, как, например, двукольчатые углеводороды, так называемые *цис*-декалин и *транс*-декалин. Два шестичленных кольца в этих веществах соединены друг с другом по-разному, и пространственно эти молекулы сильно отличаются одна от другой.

Количество органических веществ безгранично. Одних только разных углеводородов состава $C_{20}H_{42}$ может быть 366 319, и ясно, что те три миллиона органических соединений, которые нам известны сегодня,— это ничтожная часть возможных, даже простых, органических соединений.

Вот мы ответили на вопрос, почему известно так много органических веществ. Ответ получился неожиданный. Известных нам органических веществ совсем немного, а возможное число их бесконечно. И надолго еще хватит работы химикам-органикам всего мира по созданию новых органических веществ.

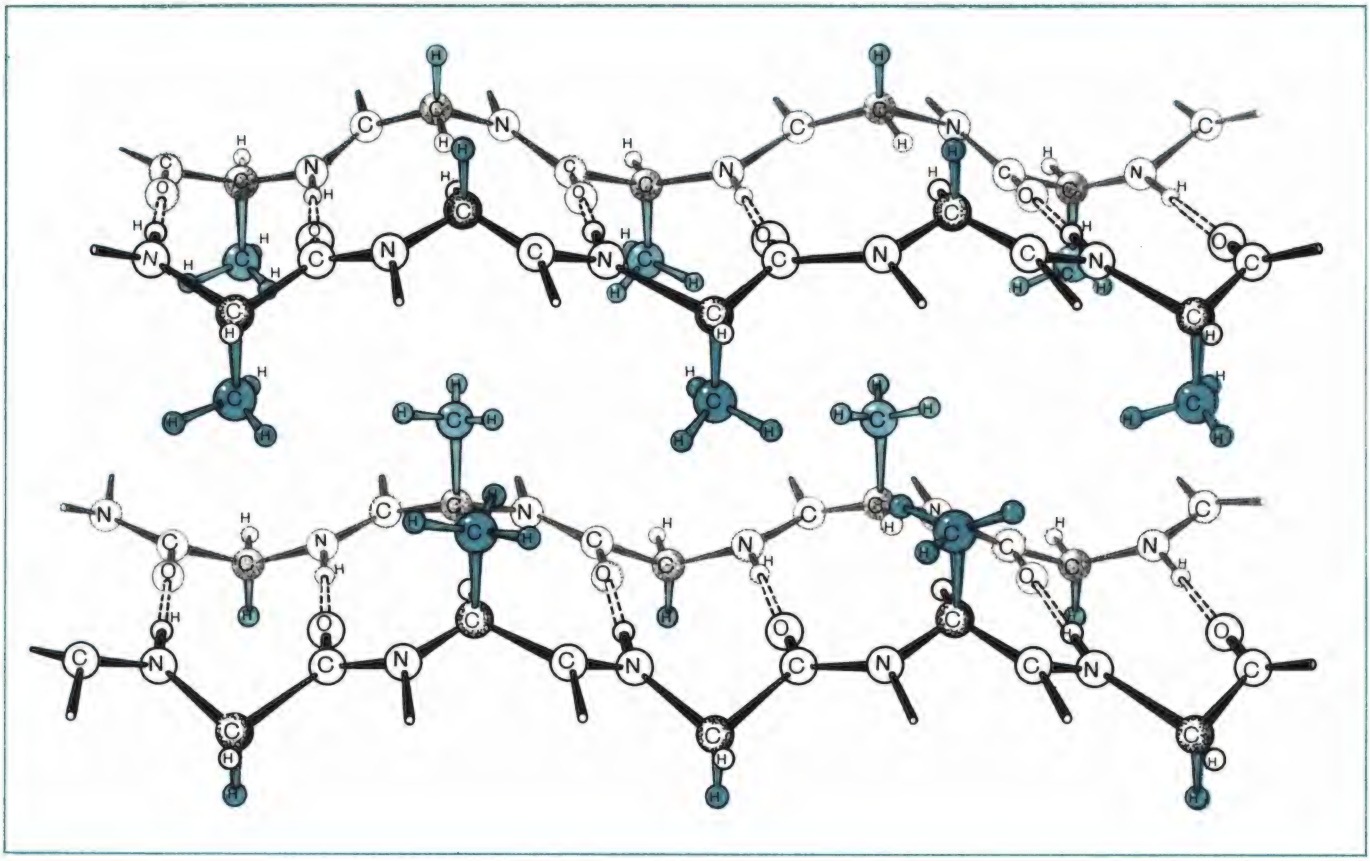
Для чего же нужны органические вещества? Какую роль они играют в природе и зачем человечество неустанно умножает число известных органических веществ?

Органические вещества в живой природе

Органические вещества лежат в основе всей живой природы. Растения и животные, микроорганизмы и вирусы — все живые существа состоят из огромного количества различных органических веществ и сравнительно небольшого числа неорганических. Именно соединения углерода, благодаря их великому разнообразию и способности к многочисленным химическим превращениям, явились той основой, на которой возникла жизнь во всех ее проявлениях. Носителями тех свойств, которые включаются в понятие «жизнь», являются сложные органические вещества, молекулы которых содержат цепи из многих тысяч атомов — *биополимеры*.

Прежде всего это *белки* — носители жизни, основа живой клетки. Сложные органические полимеры — белки состоят главным образом из углерода, водорода, кислорода, азота и серы. Их молекулы образованы соединением очень большого числа простых молекул — так называемых *аминокислот* (см. ст. «Химия жизни»).

Существует очень много разных белков. Есть белки опорные, или структурные. Такие белки входят в состав костей, образуют хрящи, кожу, волосы, рога, копыта, перья, чешую рыб. В состав мышц структурные белки входят вместе с белками, выполняющими сократительные функции. Сокращение мышц (важнейшая роль белков этого типа) — это превращение части химической энергии таких белков в механическую работу. Очень большая группа белков регулирует химические реакции в организмах. Это *ферменты* (биологические катализаторы). В настоящее время их известно более тысячи. Высокоразвитые организмы умеют вырабатывать еще и защитные белки — так называемые антитела, которые способны осаждать или связывать и тем обез-



вреживать проникшие извне в организм посторонние вещества и тела.

Наряду с белками важнейшие функции жизни несут *нуклеиновые кислоты*. В живом организме всегда происходит обмен веществ. Постоянно обновляется состав почти всех его клеток. Обновляются и белки клеток. Но ведь для каждого органа, для каждой ткани нужно изготовить свой особенный белок, со своим неповторимым порядком аминокислот в цепи. Хранители этого порядка — нуклеиновые кислоты. Нуклеиновые кислоты являются своего рода шаблонами, по которым организмы строят свои белки. Часто образно говорят, что в них записан код синтеза белка. Для каждого белка — свой код, свой шаблон. У нуклеиновых кислот есть еще одна функция. Они шаблоны и для самих нуклеиновых кислот. Это своего рода «запоминающее устройство», при помощи которого каждый вид живых существ передает из поколения в поколение коды построения своих белков (см. ст. «Химия жизни»).

Опорные функции в живой природе выполняют не только белки. В растениях, например, опорные, скелетные вещества — целлюлоза и лигнин. Это тоже полимерные вещества, но совсем другого типа. Длинные цепи атомов целлюлозы построены из молекул глюкозы, относящейся к группе сахаров. Поэтому целлюлозу относят к полисахаридам. Строение лигнина до сих пор окончательно не установлено. Это тоже полимер, по-видимому, с сетчатыми молекулами. А у насекомых опорные функции выполняет хитин — тоже полисахарид.

Есть большая группа веществ (жиры, сахара, или углеводы), которые переносят и запасают химическую энергию. Они (вместе с белками пищи) являются запасным строительным материалом, необходимым для образования новых клеток (см. ст. «Химия пищи»). Множество органических веществ (витамины, гормоны) в живых организмах играют роль регуляторов жизнедеятельности. Одни регулируют дыхание или пищеварение, другие — рост и деление клеток, третьи — деятельность нервной системы и т. п. В живых организмах содержатся многочисленные вещества самых разнообразных назначений: красящие, которым мир цветов обязан своей красотой, пахучие — привлекающие или отпугивающие, защищающие от внешних врагов, и много других. Растения и животные, даже каждая отдельная клетка — это маленькие, но очень сложные лаборатории, в которых возникают, превращаются и разлагаются тысячи органических веществ. Многочисленные и разнообразные химические реакции протекают в этих лабораториях в строго определенной последовательности. Создаются, растут и затем распадаются сложнейшие структуры...

Мир органических веществ окружает нас, мы сами состоим из них, и вся живая природа, среди которой мы живем и которую мы постоянно используем, состоит из органических веществ.

Строение природного полимера — белка фиброина шелка. Отдельные полимерные цепи соединены между собой водородными связями (пунктир).

Человек и органические вещества

Органические вещества известны человеку с глубокой древности. Прежде всего это природные органические материалы растительного или животного происхождения, из которых человек делал орудия труда и другие предметы. Из кожи изготовлялись обувь и одежда; шерсть домашних животных или растительные волокна шли на изготовление тканей; древесина служила топливом и одновременно материалом для изготовления орудий и постройки жилищ. Наконец, пища — ведь она вся растительного или животного происхождения и состоит главным образом из органических веществ (см. ст. «Химия пищи»).

Природные органические материалы обычно сложные смеси разных веществ и лишь в редких случаях более или менее чистые индивидуальные вещества. Например, волокно хлопка состоит почти из чистой целлюлозы. Сравнительно давно человек научился выделять из природных материалов отдельные полезные ему вещества и превращать одни вещества в другие. Таков был уксус древних — водный раствор уксусной кислоты (приправа к пище), винный спирт. Брожение сахаристых соков с образованием спирта было известно всем древним народам: древние греки и все народы Малой Азии знали виноградное вино, египтяне и древние германцы — пиво, а древние славяне — мед (напиток из меда). В Азии и Африке издревле было известно крашение тканей и кожи природными органическими красителями. С незапамятных времен применяли настойки и экстракты для врачевания.

Знания о веществах и их превращениях постепенно расширялись и углублялись, и к XVIII в. они слились в науку химию. Процесс превращения химии в строгую количественную науку продолжался более ста лет. Он был начат Р. Бойлем в Англии еще в XVII в. и завершен М. В. Ломоносовым в России и А. Лавуазье во Франции в конце XVIII в. В химических лабораториях стали применять измерение объемов газов, выделяющихся или поглощающихся при реакции, и точное взвешивание веществ. Но еще полстолетия прошло, прежде чем на службу человеку был поставлен органический синтез, т. е. искусственное получение определенных органических веществ из простейших исходных соединений.

В 1856 г. английский химик У. Перкин получил первый синтетический органический краситель — *мовеин*. Эта пурпурная краска образовывалась при окислении неочищенного анилина. Он сразу оценил практическое значение своего открытия. Ведь анилин можно было получить из бензола по способу, открытому незадолго до этого русским химиком Н. Н. Зининым, — восстановлением нитробензола. А бензол уже тогда умели получать из каменноугольного дегтя — отброса производства светильного газа из угля. Начиная с 1814 г. способ освещения городов светильным газом быстро распространился из Англии на континент, и... столь же быстро стали расти груды неиспользованного отхода — дегтя, который в лучшем случае применялся для обмазки стен или как плохое топливо. Перкин запатентовал свое открытие и уже в следующем году стал производить мовеин фабричным путем.

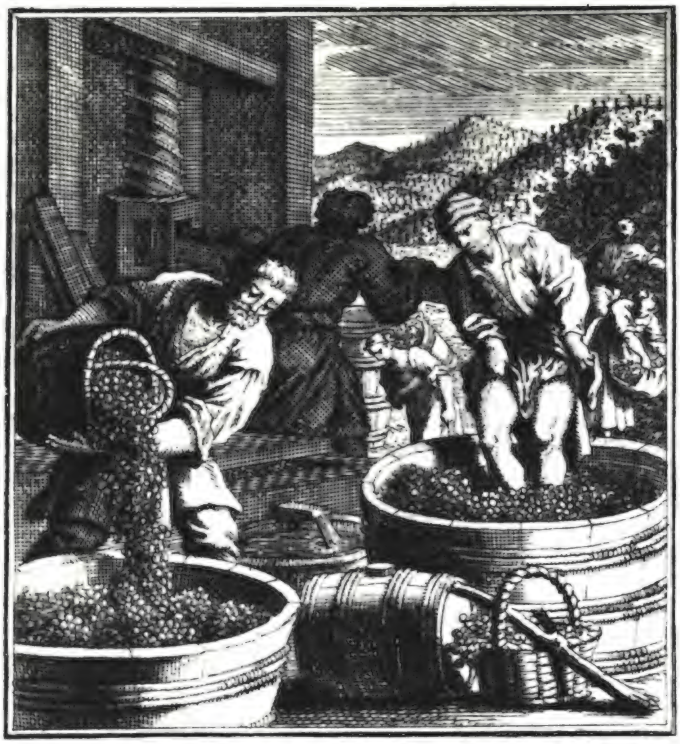
В то время химики знали много хороших красителей для тканей: индиго, ализарин, кошениль, различные сорта сандалов. Однако все это были дорогие природные вещества. Прекрасный алый краситель — кошениль — добывался в Мексике; он представлял собой высушенные и измельченные тела насекомых — червецов, живущих на некоторых видах кактусов. Ради синего индиго во многих странах разводили плантации вайды — растения, из которого получали индикан, образующий при специальной обработке индоксил, легко окисляющийся на воздухе в индиго.

Однако синтетические красители оказались несравненно более дешевыми, и синтетическое индиго быстро вытеснило природное. Вайда как сельскохозяйственная культура исчезла с полей Европы. Синтетический ализарин заменил природный ализарин, который добывали из корней марены, и культура марены, как и вайды, прекратила свое существование.

Создание теории строения органических веществ

Синтез мовеина был случайным. Перкин на самом деле собирался получить бесцветное вещество хинин — лекарство против малярии, а получил краску. Теперь мы знаем, что хинин он таким образом и не мог получить, но тогда этого еще не знали. Химики не имели представления о том, как устроены молекулы органических веществ.

И хотя ученые открывали все больше и больше новых органических веществ и даже начали получать их одно из другого, развитие органического синтеза тормозилось отсутствием теории. По образ-



Брожение виноградных соков с образованием спирта было известно еще древним народам.

ному выражению немецкого химика Ф. Вёлера, органическая химия в этот период представлялась ему дремучим лесом, изобилующим чудесными вещами, огромной чащей без выхода, без конца. Лишь пользуясь теорией, можно было найти дорогу в этом лесу.

Такая теория возникла во второй половине XIX в. В 1861 г. профессор органической химии Казанского университета Александр Михайлович Бутлеров впервые высказал и позже доказал опытным путем основной принцип *теории химического строения*: свойства веществ зависят не только от их состава, но и от химического строения, т. е. от расположения в молекуле атомов и от характера связей между ними. Изучая химические свойства веществ, их взаимодействия, можно установить химическое строение их молекул. Эта теория была революционной, она помогала не только изучать превращения веществ, но через превращения познавать их внутреннюю структуру и предсказывать новые, еще не изученные свойства.

В создании теории химического строения выдающуюся роль сыграли еще два химика — немецкий химик А. Кекуле и молодой англичанин А. Купер. Кекуле в 1858 г. открыл четырехвалентность углерода и способность этого элемента образовывать цепи атомов. Купер разработал способ изображения строения молекул органических веществ при помощи структурных формул (1858).

Новая теория стала быстро развиваться. Э. Эрленмейер (1864) открыл двойные связи между атомами углерода, Я. Г. Вант-Гофф и Ж. Ле Бель (1874) ввели представление о пространственном расположении атомов. В. В. Марковников (1869) разработал учение о взаимном влиянии атомов в молекуле. В первой половине XX в. была доказана электронная природа связей между атомами — теория химического строения обогатилась учением о валентных электронах и стала электронной теорией. В теории химического строения стало возможным использовать методы математического расчета строения молекул, заимствованные из квантовой физики. Вот уже более ста лет теория химического строения является путеводной звездой для исследований в области органической химии; она дала столь мощный толчок исследованиям, какой редко исходил из какой-либо другой естественнонаучной теории.

Итак, теория была найдена. С этого времени началось быстрое развитие органического синтеза. У химиков появилось изумительное по своей остроте и надежности средство предвидения. Всякое вещество имело определенную формулу строения. Формула предсказывала существование неизвестного вещества, и это вещество удавалось синтезировать. Формула предсказывала химические свойства вещества, его химические реакции, и эти реакции удавалось осуществить в лаборатории. Синтезировались тысячи, десятки и сотни тысяч новых веществ, и все они укладывались в систему теории. Это был триумф теории химического строения. Конечно, иногда встречались вещества или их химические реакции, которые не укладывались в уже известные рамки теории. Что ж, эти факты только служили ее дальнейшему развитию. Теория обогащалась, развивалась, совершенствовалась...

А поток новых веществ все увеличивался... Новые красители, лекарственные препараты, душистые вещества, растворители, дубильные вещества и многое другое...

Краски всех цветов и оттенков

Долгое время промышленность красителей определяла развитие органического синтеза, а химия красящих веществ ежегодно давала наибольшее число новых органических соединений. Коксохимия — переработка каменноугольной смолы — явилась замечательным источником полупродуктов для производства красок. Из этой смолы было выделено более 150 различных органических веществ, многие оказались прекрасным сырьем для изготовления красок.

Краски для хлопка, краски для шерсти, краски для шелка, краски всех цветов и оттенков, все более яркие, все более прочные! Люди хотят одеваться дешево, красиво — повышаются требования к цвету, его чистоте, оттенку, к тому, чтобы окрашенные ткани не линяли при стирке, не выцветали на солнце. В ответ на эти требования появлялись все новые и новые красители; дешевые вытесняли дорогие, лучшие вытесняли хорошие.

Получили распространение самые разнообразные способы крашения тканей: *субстантивное*, когда ткань, проходя через красильную барку, сама «выбирает» краситель из раствора; *протравное*, когда ткань сначала пропитывается «протравой», содержащей соли тяжелых металлов — хрома, алюминия, олова и других, потом ее красят в барке и затем уже подвергают «запарке» при повышенной температуре, при этом соль металла образует с красителем яркий, прочный, несмываемый лак; при так называемом *ледяном* крашении ткань пропитывается при низкой температуре последовательно двумя бесцветными растворами, содержащими вещества, которые уже на ткани вступают в химическую реакцию образования красителя. Очень прочные окраски дает *кубовое* крашение. Нерастворимый в воде краситель сначала переводится в бесцветное, но растворимое в воде вещество; этим раствором «красят» ткань, и из красильной барки она выходит бесцветной, но при «запарке» происходит окисление кислородом воздуха, и снова из бесцветного вещества образуется краситель, прочно отложившийся на волокне.

А сколько изобретательности было проявлено для печатания рисунков на ткани! Существует множество разных приемов крашения и печатания. Искусство крашения тканей и печатания на них рисунка требует специальных знаний. Специалисты этого дела — колористы — совмещают в своем труде знания химика, опыт инженера и чутье художника.

Органические красители нужны также для окрашивания кожи, меха, для изготовления цветных чернил, для книгопечатания, живописи, цветных кинофильмов и для многих других целей. Во всех случаях к красителям предъявляются разные требования, и химики должны были искать и находили вещества, удовлетворяющие этим требованиям.

Еще недавно казалось, что химики-красочники в союзе с колористами решили все основные задачи. Но в последние годы появилось много новых синтетических волокон для текстильных тканей: капрон, лавсан, нитрон и др. Оказалось, что старые красители непригодны для окрашивания этих тканей. И снова поиски новых органических веществ...

Александр Михайлович Бутлеров (1828—1886)

Русский химик, член Петербургской Академии наук. Создатель теории строения органических веществ (1861), лежащей в основе современной органической химии. Бутлеров впервые ввел в химию термин «химическая структура», подразумевая под этим распределение связей отдельных атомов, образующих молекулу. На основе этой теории он синтезировал третичные спирты и другие соединения, получил изобутилен и открыл реакцию его полимеризации. Это явилось началом химии высокомолекулярных соединений.

Органические красители для фотографии и кино

Как известно, ранее выпускавшиеся фотографические пластинки и пленки были нечувствительны к красному цвету. Поэтому их проявляли при свете красного фонаря. Светочувствительность была различной к разным участкам спектра: очень высокая к фиолетовым и синим лучам, она понижалась к красному концу спектра. Поэтому фотоснимок неточно передавал тона изображения. Общая светочувствительность этих пластинок и пленок была невелика; при фотографировании применялись большие выдержки, что очень сокращало возможности моментальной фотографии. Перед химиками встал вопрос, как повысить чувствительность фотопленки и сделать ее более равномерной по отношению к различным цветам. Эта задача была решена. Были

Всего сто лет назад эти растения были очень известны. Из вайды (*слева*) получали краску синее индиго, а из корней марены *(справа)* — ализарин.
Но синтетические красители быстро вытеснили природные, и эти культуры прекратили свое существование.

Современная красильная машина на фабрике «Трехгорная мануфактура» в Москве.

Краски для хлопка, краски для шелка, краски всех цветов и оттенков, все более яркие, все более прочные!

найдены новые красители — так называемые *сенсибилизаторы*, повышающие чувствительность фотографического слоя к свету. Появились *ортохроматические пластинки*, чувствительность которых к желто-оранжевой части спектра была повышена, *панхроматические* — чувствительные ко всем цветам видимого света. Эти пленки подлежат обработке в полной темноте, что, конечно, неудобно, особенно для художественной фотографии. Однако и это неудобство преодолели. Были найдены специальные красители — *десенсибилизаторы*. Если перед проявлением экспонированную пленку обработать в темноте раствором десенсибилизатора, то потом ее можно проявлять... на свету. Пленка почти полностью теряет свою светочувствительность.

Были найдены также специальные *инфракрасные сенсибилизаторы*, и фотографирование стало возможным через дымку и даже ночью. Новые инфрахроматические фотопленки воспринимали невидимые глазу инфракрасные лучи и оказались очень ценными для аэрофотосъемки. А в настоящее время химики во всем мире заняты проблемой создания

фотоматериалов, лишенных дорогого бромистого серебра.

Интересно решили химики задачу цветного фотографирования. Она была очень трудна и потребовала десятилетий упорного исследовательского труда. Пленка для цветного фотографирования содержит три цветочувствительных слоя. В каждом слое находится, как обычно, светочувствительное бромистое серебро. В одном слое к нему добавлен сенсибилизатор, делающий его чувствительным только к красным лучам, в другом — к зеленым, в третьем — к голубым. В каждый слой, кроме того, введены так называемые цветные компоненты — пока бесцветные вещества. После фотографирования такая пленка проявляется специальным проявителем. В первом слое проявляются только те места пленки, куда упал красный свет, так как к другим лучам этот слой нечувствителен. Бромистое серебро в этом месте восстанавливается и превращается в черное металлическое серебро, а то, что образовалось из проявителя в процессе проявления, вступает в реакцию с цветной компонентой и образует красную краску. Таким же образом во втором слое образуется зеленая краска в тех местах, куда упали зеленые лучи, а в третьем слое — синяя. Теперь остается удалить из изображения металлическое серебро и остаток бромистого серебра (эта операция похожа на обычное «закрепление»), и цветное изображение готово. Такой процесс называется процессом с «обращением», а пленка — «обратимой», так как на ней сразу появляются натуральные цвета. Другой процесс — «негативный» — сложнее, но основан на тех же принципах.

Кажется, просто? А ведь потребовалось испытать тысячи красителей, сотни сенсибилизаторов, десятки проявителей, чтобы все это подобрать. Когда вы смотрите красивый цветной кинофильм, вспомните об энтузиастах-искателях, трудолюбивых и изобретательных химиках, создавших цветную кинопленку и цветное проявление.

Лекарственные вещества

Органические вещества для врачевания начали применять еще на ранних ступенях развития человеческого общества. Уже в древнем Египте были известны многие лекарственные растения: клещевина, горчица, морской лук и др. Древние греки и римляне не только хорошо знали лечебное действие многих растений, но и умели готовить из них экстракты, настойки, пилюли и прочие лекарственные средства. Многие лекарственные средства растительного происхождения стали известны европейцам после Великих географических открытий XVI—XVII вв. Из Америки, например, были привезены кора хинного дерева, ипекакуана, гидрастис. Издревле много лекарственных растений знали народы Средней Азии. Знания их были собраны в «Медицинском Каноне врачебной науки» знаменитого среднеазиатского ученого XI в. Ибн-Сины, или Авиценны.

С развитием научной химии все в большем количестве вместо целых растений или растительных экстрактов стали применять лекарственные вещества, выделенные из растений в более или менее чистом виде. Позже начали применять синтетические лекарственные вещества. Это произошло одновременно с развитием химии красящих веществ. Немецкий врач и исследователь П. Эрлих исходил из опыта окрашивания микробов под микроскопом. Он считал, что с микробами можно бороться ядовитыми для них красками. Действительно, метиленовый синий краситель оказался пригодным для лечения малярии. Особого успеха ученый добился, использовав красители, молекулы которых содержали мышьяк. Потом оказалось, что лекарства могут быть найдены и среди бесцветных веществ. Чтобы найти нужное органическое вещество, Эрлих испытывал большое количество веществ, каждое из которых отличалось от предыдущего лишь небольшим изменением в строении молекулы. Если изменение в строении ухудшало лечебное действие, Эрлих от него отказывался; если улучшало, он сохранял это изменение в следующих веществах, и т. д. Такие исследования требовали много времени и сил: необходимо было синтезировать очень большое количество веществ, а затем испытать их лечебное действие. В конце концов они приводили к цели. Это эмпирический метод. Он сохранил свое значение и в наши дни.

Однако более рационален другой путь, который основывается на глубоком изучении способа действия лекарственного вещества. Нужно знать, как оно распределяется в организме, на какие органы действует, в какие химические реакции вступает. Средства против инфекционных болезней должны быть ядовиты для микробов — возбудителей болезни, но неопасны для человека; средства против неинфекционных болезней должны действовать на одни органы человека и не затрагивать другие. Знание механизма действия, особенно его химической стороны, позволяет находить избирательно действующие вещества и, значит, более сознательно синтезировать новые средства лечения заболеваний.

Много новых лекарственных веществ синтезировали химики за последнее время. Появились новые средства лечения инфекционных болезней и даже таких опасных, как туберкулез или малярия, пневмония или менингит; средства, регулирующие кровяное давление, стимулирующие деятельность сердца, обезболивающие, снотворные; созданы препараты для лечения психических заболеваний, а в последнее время появились первые надежды найти химические средства лечения рака. И здесь, как и в химии красящих веществ, трудится целая армия химиков, физиологов, бактериологов, фармакологов, врачей. Синтезируют тысячи и десятки тысяч веществ. Одних только сульфамидных препаратов было синтезировано свыше 6000, чтобы в конечном счете остановиться на десятке из них для внедрения в медицину.

Лес — источник органических веществ

Много ценных органических веществ поставляет лесохимия. При нагревании древесины без доступа воздуха происходит обугливание; при этом образуются древесный уголь, смола и летучие продукты. Древесный уголь идет в доменное производство, а также для изготовления активированного угля, смола или деготь — на приготовление флотационных масел и других продуктов, а из летучих веществ, конденсирующихся в виде дегтярной воды, выделяют метиловый спирт, уксусную кислоту, ацетон.

Углежжение — сухая перегонка дерева — известно с незапамятных времен. Сначала дрова обугливали в кучах, покрытых слоем земли, потом в примитивных печах. При этом все ценные летучие продукты терялись. Теперь процесс обугливания ведется в металлических печах — ретортах, куда вкатываются вагонетки с дровами. Летучие продукты полностью улавливаются. По окончании процесса из реторт выкатываются вагонетки с углем. Миллионы кубических метров дров, главным образом березовых и осиновых, ежегодно превращаются в уголь.

Другой лесохимический источник органических продуктов — живица хвойных, главным образом сосны. Ствол и ветви сосны имеют систему так называемых смоляных ходов, заполненных жидкой смолой. При ранении дерева липкая смола затягивает рану и таким образом защищает его от проникновения насекомых, микроорганизмов и т. п. Чтобы получить сосновую смолу, на дереве делают специальные надрезы — карры, из которых постепенно вытекает светло-желтая липкая, приятно пахнущая смола — живица. На воздухе она постепенно густеет и темнеет. Из живицы перегонкой получают скипидар и канифоль, используемые для различных технических целей.

Главные продукты химической переработки древесины — это целлюлоза и бумага. В отличие от углежжения здесь используется древесина хвойных пород, в основном еловая. Часто сырьем для производства целлюлозы служат отходы лесопильных заводов. Целлюлоза нужна для изготовления искусственного шелка (вискозный и ацетатный шелк), нитроцеллюлозы (для производства кинопленки), пироксилина (взрывчатое вещество, из которого изготовляют бездымный порох). В последнее время быстро развивается производство спирта из древесины.

Много других видов растительного сырья применяют для получения органических веществ. Из сахарной свеклы или сахарного тростника получают сахар, из семян масличных растений — подсолнечника, льна, хлопка, кукурузы — добывают растительные жиры, из эфироносных и душистых растений, таких, как мята, анис, миндаль, жасмин, получают пахучие масла для парфюмерии, из каучуконосных деревьев, разводимых в Южной Америке, в Индонезии и в других тропических странах, — каучук, из дубильных растений — дубильные экстракты для выделки кож.

«Черное золото» — нефть

Ни коксохимия, ни лесохимия, ни другие менее крупные источники органических веществ не смогли, однако, удовлетворить все возрастающую потребность человечества в химическом сырье. Начиная с 20-х годов нашего века важнейшими источниками органических продуктов стали нефть и природные газы.

Нефть — это смесь углеводородов самого разнообразного строения. Их молекулы представляют собой и короткие цепи атомов углерода, и длинные, и нормальные, и разветвленные, и замкнутые в кольца, и многокольчатые. Кроме углеводородов нефть содержит небольшие количества кислородных и сернистых соединений и совсем немного азотистых.

Нефть образовалась на Земле в прошлые геологические эпохи в результате разложения грандиозных

скоплений растительных и животных остатков, особенно морского планктона. В ходе геологических процессов нефть видоизменялась, перемещалась из одних слоев в другие и, наконец, образовала известные нам крупные месторождения: на Кавказе, в Поволжье и Приуралье, в Западной Сибири, в Иране и Ираке, в Калифорнии и Техасе, в Венесуэле, в Сахаре и в других районах земного шара.

Очень интересна история добычи и переработки нефти. Как и многие другие источники органических веществ, она была известна многим древним народам. Раскопки на берегах Евфрата установили, что за 6000—4000 лет до н. э. нефть применяли как топливо. Есть сведения, что у нас на Кавказе нефть использовалась 2000 лет тому назад. Арабский историк Истархи, живший в X в., свидетельствует, что с древних времен бакинцы вместо дров жгли землю, пропитанную нефтью. Нефть издавна вывозили из Баку в качестве осветительного материала.

Бурение скважин и промышленная добыча нефти начались, однако, гораздо позже — только с середины XIX в. Нефть и продукты ее переработки (керосин) применяли для освещения. Потом нефть и мазут стали употреблять как топливо для паровых котлов (пароходных и паровозных), а также для получения смазочных материалов. С появлением двигателей внутреннего сгорания, в том числе дизелей (получивших название по фамилии немецкого изобретателя Р. Дизеля), продукты переработки нефти — керосин, соляровое масло и более тяжелые масла стали широко применять как топливо. Именно это вызвало быстрое развитие добычи и переработки нефти. Наиболее простой метод переработки нефти — прямая гонка. Этот метод заключается в перегонке нефти при нагревании в закрытых котлах или трубчатых печах. Сначала отгоняются наиболее легкокипящие погоны (бензин, лигроин), потом более тяжелый — керосин. Бензины состоят из углеводородов с 5—10 атомами углерода в молекуле, а керосиновые погоны — из углеводородов с 10—15 атомами углерода. После перегонки остается мазут — густая черная жидкость. Он употребляется как топливо или подвергается новой перегонке, чтобы выделить смазочные масла: легкие — соляровые, более тяжелые — веретенные и машинные и, наконец, тяжелые — цилиндровые.

В начале нашего века произошли коренные изменения в нефтепереработке. Быстрое распространение карбюраторных бензиновых двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием для автомобилей (а позже в авиации) потребовало очень много бензина. Это привело прежде всего к усовершенствованию нефтедобычи, так как при старом открытом способе много легкокипящих фракций испарялось на воздухе. Однако этого было недостаточно. При прямой гонке получалось сравнительно мало бензиновых фракций, и они не могли удовлетворить все возрастающий спрос. Особенно остро ощущалась нехватка бензина в годы первой мировой войны. Тогда в промышленность был введен крекинг-процесс — разложение углеводородов нефти под влиянием высокой температуры. При нагревании до 500—600° С углеводородные цепочки разрываются и образуются осколки с меньшим числом атомов углерода в молекуле, т. е. повышается содержание легкокипящих фракций. Промышленное освоение крекинг-процесса сразу повысило ресурсы бензина. Однако качество бензинов термического крекинга было не всегда удовлетворительным. А высококачественный бензин был нужен авиации.

Русский химик Н. Д. Зелинский предложил усовершенствовать крекинг с помощью ускорителей процесса — катализаторов. В качестве катализатора он применил хлористый алюминий. Французскими инженерами был предложен алюмосиликатный катализатор. В его присутствии происходило образование фракций, содержащих высококачественный бензин, пригодный для авиационных двигателей.

Однако жизнь шла вперед. Бензиновые двигатели внутреннего сгорания становились все быстроходнее, все мощнее и в то же время все легче и меньше по размерам. Этого удалось достичь, повышая степень сжатия топлива в цилиндрах двигателя. Однако в момент сильного и быстрого сжатия паровоздушная смесь преждевременно взрывалась — *детонировала*. Это приводило к стукам в двигателе и потере мощности. Борьба с детонацией на долгое время стала главной задачей улучшения методов нефтепереработки. Оказалось, что различные углеводороды, содержащиеся в бензинах, детонируют с различной легкостью. Углеводороды с сильно разветвленными цепочками атомов, а также ароматические детонировали труднее, чем углеводороды с нормальной цепочкой атомов углерода.

Способность бензинов противостоять детонации характеризуют так называемым *октановым числом*: чем оно выше, тем бензин лучше. Значит, и нефть нужно перерабатывать так, чтобы получать бензины с возможно большими октановыми числами. Кроме каталитического крекинга появились новые процессы нефтепереработки — риформинг, платформинг. Особое значение в них получили реакции ароматизации нефтяных углеводородов, открытые и разработанные советскими химиками. Промышленность стала даже на путь синтеза углеводородов с разветвленной цепью (изооктана и триптана), чтобы использовать их как добавки к бензинам и повышать, таким образом, антидетонационные свойства. Особенно успешно стали применять специальные добавки к топливу — так называемые *антидетонаторы*. Добавленные в небольшом количестве к бензину, они значительно повышают его октановое число. Таков тетраэтилсвинец (сокращенно ТЭС). Бензин с этим антидетонатором (этилированный) очень ядовит. Будьте всегда осторожны с этилированным бензином: не обливайте им руки, старайтесь, чтобы бензин случайно не попал вам в рот или в глаза.

Теперь найден лучший антидетонатор, чем ТЭС. Это вещество со сложным названием — циклопентадиенилтрикарбонил марганца, или ЦТМ. Как видно из названия, это органическое вещество содержит марганец. Скоро появятся в гаражах «марганцевые» бензины.

Казалось, переработка нефти решила все проблемы, поставленные перед ней автомобильными и авиационными конструкторами. Но жизнь шла вперед, и на смену двигателям внутреннего сгорания пришли реактивные и ракетные двигатели. Оказалось, что здесь не нужны высокие октановые числа. Наоборот, лучшее топливо — это углеводороды с прямыми малоразветвленными цепочками атомов углерода или кольчатые, и притом не бензиновые фракции, а керосиновые и солярные. Все наоборот! И снова поиск, снова открытия, снова изменения нефтепереработки.

И это еще не все! До сих пор речь шла о применении нефтепродуктов в качестве топлива. Менялись типы двигателей: от паровых машин к дизелям, к бензиновым моторам, потом к реактивным двигателям. Но в них использовалось только тепло, образующееся при сгорании топлива!

Для химика-органика сжигание нефтяных углеводородов — непростительное расточительство. Ведь эти углеводороды так нужны для химического синтеза! Из них можно сделать так много ценных химических продуктов! И нефтехимический синтез выступил мощным конкурентом транспорта в потреблении нефти. Прежде всего пошли в дело нефтяные газы, состоящие из углеводородов с маленькими цепочками атомов углерода — от 1 до 5. Из этилена $CH_2 = CH_2$ можно получать этиловый спирт, а из него — синтетический каучук (СК). Из этилена

Дефолианты — вещества, которые вызывают опадение листьев у растений, нужны, например, для обработки посевов хлопчатника перед сбором урожая. На снимке: хлопкоуборочная машина.

же получается прекрасный широкоизвестный полимер полиэтилен. Из пропилена $CH_3CH=CH_2$ можно получить изопропиловый спирт и ацетон; пропилен нужен для производства фенола, наконец, из него можно получить полипропилен и акрилонитрил — сырье для производства синтетической шерсти. Другие нефтяные газы тоже находят важное применение в нефтехимическом синтезе. Значит, нефтепереработку нужно вести иначе. Нужно получать как можно больше газов, молекулы которых содержат двойные связи между атомами углерода.

Между нефтью — топливом и нефтью — химическим сырьем началась напряженная борьба.

Конечно, в настоящее время и в ближайшее время нефть будут использовать главным образом как топливо. Однако доля нефти, расходуемая на химическую переработку, непрерывно возрастает.

А совсем недавно появился еще один возможный потребитель нефти. Он пока еще «младенец», и ему много нефти не нужно. Но как знать? Это микробиологическая переработка нефти на... белки. Нашлись бактерии, которые хорошо живут на нефти, потребляя ее в пищу. Нефть исчезает, бактерии растут. Постепенно (и не так уж медленно) исчезает значительная часть нефти, и вместо нее образуется масса клеток бактерий, содержащая много белка, который можно использовать как корм. В настоящее время предпринимаются попытки вырастить такие бактерии, которые поглощали бы из нефти только ненужные примеси. Это может привести к появлению микробиологических нефтеочистительных заводов, побочной продукцией которых будет кормовой белок.

До сих пор шла речь о газах нефтепереработки. Однако есть и природный газ, образующий громадные скопления в толще земли. Природный газ в основном состоит из метана CH_4. Он добывается в громадных количествах и используется как горючее для промышленных и бытовых целей. Вместе с нефтяными газами, сопутствующими нефти, и газами нефтепереработки природный газ является важным источником для синтеза разнообразных органических веществ. Самый большой химический потребитель газа — промышленность полимерных материалов (см. ст. «Полимеры»).

Органические вещества в сельском хозяйстве

В повышении урожаев зерна, хлопка, сахарной свеклы и других сельскохозяйственных культур большую роль играют органические вещества. Прежде всего речь идет о средствах защиты растений от сорняков, вредителей и болезней. Уже давно химики старались найти вещества ядовитые для сорняков и безвредные для полезных растений. Такие вещества были найдены — это *гербициды*. Одни из них уничтожают широколиственные сорняки и не затрагивают злаки. Другие, наоборот, уничтожают злаки-сорняки и не трогают, например, хлопчатник. Есть специальные гербициды для защиты от сорняков кукурузы, сахарной свеклы. Но трудно найти вещества для химической прополки злаковых культур от злаковых же сорняков, например от упрямого пырея.

Есть средства, которые не убивают растения, а только вызывают у них опадение листьев. Это так называемые *дефолианты*. Такие вещества нужны, например, для обработки посевов хлопчатника перед сбором урожая. Сбор хлопка вручную — дело очень трудоемкое. Сконструированы специальные машины для сбора хлопка. Однако работе этих машин очень мешают листья. Поэтому перед сбором урожая нужно удалить у хлопчатника листья, и притом так, чтобы не повредить раскрывшиеся коробочки хлопка. Вот здесь-то и приходят на помощь дефолианты. Достаточно обработать поле с самолета раствором дефолианта, чтобы через некоторое время все листья опали, а коробочки с хлопком остались на ветках.

Существует множество насекомых, поражающих культурные растения. Некоторые из них размножаются в таком количестве, что становятся сущим бедствием. Кто не знает о саранче, которая превращает цветущие поля в голую землю. Есть не менее

опасные вредители: они не летают тучами, как саранча, но основательно портят, а иногда и полностью уничтожают урожай. Таковы, например, клоп вредная черепашка (повреждает посевы пшеницы) или паутинный клещик (уничтожает посевы хлопчатника). А кому не приходилось видеть яблоки, поврежденные плодожоркой?

Многие годы тысячи химиков трудились, чтобы открыть соединения, уничтожающие вредителей,— *инсектициды*. Были найдены так называемые контактные препараты; они уничтожали насекомых при попадании яда на поверхность их тела. Таков, например, хлорофос.

Были открыты также инсектициды системного, или внутрирастительного, действия. Когда такой препарат попадает на растение, оно всасывает его. Соки растения становятся ядовитыми. И горе насекомому-вредителю, которое попытается питаться соками этого растения. Оно погибнет! Лучшие системные инсектициды содержат фосфор: это фосфорорганические вещества, например фосфамид, препарат М-81.

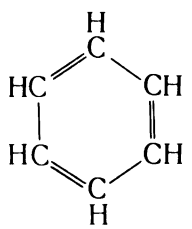
Разработка этих ядов очень сложное и ответственное дело. Ведь растения, опрыснутые или опыленные ядами, могут стать ядовитыми и для людей! Значит, нужно найти такие инсектициды, которые ядовиты для насекомых и неопасны для людей и домашних животных. Это в принципе та же задача избирательности действия, о которой мы говорили в разделе о лекарственных веществах. Уже сами цифры — названия некоторых препаратов — говорят о большой работе, проделанной перед тем, как их нашли: Е-600, М-81, Байер-S-1752. Подумайте, сколько веществ нужно было синтезировать и испытать!

И здесь многое еще остается нерешенным. Важно, чтобы инсектициды не накапливались в природе, не заражали водоемы, не травили рыбу... В последнее время наметились новые пути борьбы против вредных насекомых на основе применения привлекающих (аттрактантов) и гормоноподобных веществ, действующих в ничтожных концентрациях и высокоизбирательно.

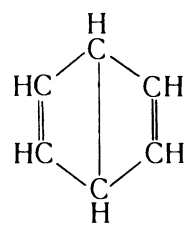
Кроме насекомых растения часто поражают болезни — грибковые, вирусные, бактериальные.

Сколько существует бензолов!

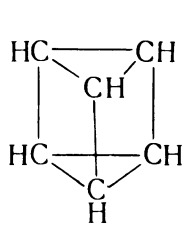
В то время когда химики решали вопрос о строении бензола — углеводорода C_6H_6, родоначальника многочисленных и очень важных органических соединений, было предложено много формул, отличающихся друг от друга. Из них наиболее известными стали три: формула Кекуле (шестичленный цикл с чередующимися двойными и простыми связями), формула Дьюара (шестичленный цикл с двумя двойными связями, разделенный удлиненной связью на два четырехчлена) и Ладенбурга (треугольная призма). Позже Тиле поправил формулу Кекуле: выровнял кратные связи в цикле, так что каждая из них стала как бы полуторной



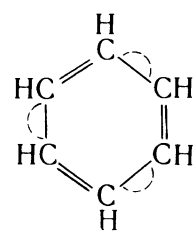
формула Кекуле



формула Дьюара

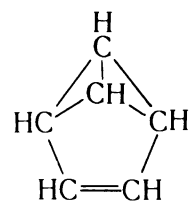


формула Ладенбурга



формула Тиле

Оказалось, что ближе всех к действительной формуле бензола был Тиле. Его формула правильно передает то важное обстоятельство, что все связи между атомами углерода в бензольном кольце совершенно одинаковы. Сейчас известно, что каждой из этих формул, кроме формулы Кекуле, отвечает реально существующий углеводород C_6H_6, изомер бензола, неустойчивый, постепенно превращающийся в бензол. Таковы дьюаровский бензол (бициклогексадиен), призман (бензол Ладенбурга). Недавно открыт еще один изомер бензола, которого не предвидели химики-классики,— бензвален:



И здесь нужны органические препараты — лекарства для растений! Снова тысячи препаратов, снова поиски, находки, промышленное производство найденных органических веществ! Здесь еще много нерешенных задач. Есть, например, опасное заболевание хлопчатника — вилт. Оно поражает тысячи гектаров посевов, а средств борьбы с ним еще нет. Но они будут, обязательно будут, если только применить знания, фантазию и упорство.

Мир окружающих нас органических веществ огромен и разнообразен. В известной части он создан руками человека, синтезировавшего сотни тысяч веществ, ранее природе неизвестных. Человек научился изменять этот мир, научился заставлять его служить себе, помогать себе в самых разнообразных случаях жизни. Это результат грандиозного труда, начинающегося в лабораториях и кончающегося на фабриках и заводах, на полях и плантациях, в клиниках и больницах... Это результат кропотливых исследований, тщательного изучения, вдохновенных идей и смелых теоретических обобщений. Гений человека и упорный труд рука об руку создали органическую химию. Они решили множество труднейших задач, ранее считавшихся неразрешимыми, создали изобилие веществ, ранее казавшихся недоступными, раскрыли сокровенные тайны природы, ранее представлявшиеся навсегда скрытыми. Науки об органических веществах — органическая химия и ее сестра — органическая химическая технология — продолжают идти вперед.

Полимеры

Для чего нужны полимеры

Слово «полимеры» за последние годы прочно вошло в наш язык. Атомная энергия, радиоэлектроника, термоядерная реакция, космос, полимеры — все эти слова олицетворяют наиболее выдающиеся достижения науки и техники сегодняшнего дня.

Наука непрерывно ведет поиски новых источников сырья, доступных и неисчерпаемых, новых веществ, дешевых и универсальных, таких, которые могли бы заменить и превзойти по своим качествам металлы, древесину, пищевое сырье, используемые в технических целях, новых материалов, обладающих более высокой прочностью, твердостью, жаростойкостью и другими свойствами. Без таких материалов невозможно полностью использовать уже достигнутые в технике сверхвысокие температуры, давления и скорости, нельзя создавать более совершенные машины, которые помогут увеличить производительность труда.

Появилась острая нужда в таких веществах, которых в природе не существует вообще. Например, не бывает прозрачных металлов, металлических изоляторов (диэлектриков) и неметаллических проводников электрического тока, «вечных» смазочных материалов и многих других. Природа «забыла» их создать, а сейчас они нам стали необходимы.

Созданием материалов, которых нет в природе, и занимается *химия полимеров*. Чтобы убедиться в том, какую роль эта отрасль человеческих знаний играет в жизни людей, достаточно лишь оглянуться вокруг. Наверняка из всех попавшихся на глаза предметов большинство будут продуктами химии, а из них добрая половина — химии полимеров.

Только химия способна изготовить ткани более прочные, чем шелк и полотно, не боящиеся действия химических веществ, обладающие целебными свойствами. Лишь она может создавать материалы, которые не растворяются ни в одной из самых крепких кислот и щелочей, выдерживают нагревание, при котором любые природные органические вещества обугливаются и сгорают. Только с ее помощью можно получить жидкости и масла, не замерзающие на самом лютом морозе и не теряющие своих свойств в настоящем пекле.

Химия полимеров способна создать материалы прочнее стали, легче пробки, эластичнее и выносливее природного каучука, долговечнее дерева и камня. В медицине уже используют полимеры, заменяющие кровь, кости и ткань человеческого организма.

Все эти необыкновенные материалы рождаются в лабораториях ученых и производятся на химических заводах из угля, нефти, природных газов, сланцев, древесных отходов.

Вещества, получаемые путем химической переработки природных полимеров, например вискозное волокно из целлюлозы, называют *искусственными*, а изготовляемые совершенно заново — *синтетическими*.

Человечество вступило в век атомной энергии. Ученые ищут пути управления термоядерной реакцией. Когда эта важнейшая задача будет решена — а ее решение, видимо, не за горами,— забота о неиссякаемых источниках энергии, которые понадобятся людям коммунистического будущего, будет снята с них навсегда. И тогда вся огромная масса добываемого ископаемого топлива — угля, нефти, природных газов, сланцев — поступит целиком в распоряжение химиков для производства бесконечного разнообразия самых удивительных вещей. Человечество получит возможность исправить вековую несправедливость. Ведь недаром в свое время Д. И. Менделеев говорил, что сжигать нефть все равно что топить ассигнациями.

Родословная больших молекул

Все окружающие нас вещества состоят из атомов, которые в ходе самых разнообразных химических реакций соединяются, собираясь в молекулы, состоящие часто из десятков, сотен, а иногда и тысяч атомов. Атомы углерода способны соединяться в длинные цепочки из десятков и сотен тысяч атомов. Вещества, состоящие из таких гигантских цепочек, и называются *полимерами*.

Из полимеров — молекул-цепочек — состоят и все клетки живой материи — растений и животных. Вот перед нами дерево. Целлюлоза — главная составная часть древесины — полимер. Мясо и шерсть животных — полимеры. Углеводы и белки зерновых злаков — тоже полимеры. Волокна хлопка, шелка, смола растений и многих других природных веществ — все это представители великой семьи полимеров.

Миллионы лет природные гигантские молекулы, или полимеры, составляли пищу, одежду человека, давали ему кров и топливо.

Химики приложили немало усилий, чтобы разгадать тайны строения гигантских молекул, это было по существу дерзким вызовом природе. Ведь вслед за этим можно было бы перейти к воспроизведению природных веществ искусственным путем, а затем и к созданию подобных им новых веществ, которых в природе не существует.

Еще в XIX в. ученые установили химический состав целлюлозы, каучука и некоторых белков. Оказалось, что эти вещества, как и большинство других органических соединений, состоят из очень немногих разновидностей атомов — углерода, азота, водорода, серы, кислорода. Но за этой простотой скрывалась масса всевозможных сюрпризов. Так, целлюлоза, вещество совершенно неплавкое и почти ни в чем не растворимое, оказалась сходной по химическому составу с легко растворимым и плавящимся сахаристым веществом — глюкозой.

Химикам стало ясно, что секрет противоположных свойств кроется не столько в самом химическом составе этих веществ, сколько в размерах и строении их молекул.

Способность органических веществ растворяться и плавиться уменьшается по мере увеличения количества атомов в их молекулах. Этим же, в частности, объясняется высокая механическая прочность природных волокон хлопка (целлюлоза), шерсти (белок), шелка и... паутины.

Молекулы этих волокон очень длинные. А так как в их состав входит ограниченное количество видов атомов, то химики пришли к выводу, что длинные молекулы образуются из периодически повторяющихся и сравнительно небольших «кирпичиков» — звеньев. Вещества, молекулы которых содержат только одно такое звено, называют *мономерами*.

Длинная молекула целлюлозы $(C_6H_{10}O_5)_n$ представляет собой цепочку, содержащую до 10 тыс. звеньев. Каждое звено — это молекула глюкозы $C_6H_{12}O_6$, у которой лишь отняты один атом водорода (—H) и гидроксил (—OH), благодаря чему и произошло соединение молекул в цепочку. Молекула природного каучука сложилась из непрерывно повторяющихся молекул углеводорода изопрена C_5H_8, сцепившихся друг с другом за счет разрыва двойных связей. Мономер — одно звено, полимер — много повторяющихся звеньев.

Ученые еще не вполне понимали структуру природных полимеров, но это уже не мешало им получать искусственные высокомолекулярные вещества. Были найдены способы превращения целлюлозы в целлулоид, в ацетатный шелк, порох, кинопленку, в красивые блестящие лаки и краски.

В 1839 г. американский исследователь Ч. Гудьир открыл способ превращения природного каучука в резину путем его вулканизации. При нагревании каучука в присутствии серы звенья его длинных молекул скрепляются между собой как бы перемычками из атомов серы. Это придает каучуку необычную прочность и эластичность. Главным потребителем резины стала бурно развивающаяся с начала XX в. автомобильная промышленность. И в настоящее время она поглощает более 85% всей производимой в мире резины.

Первые искусственные пластмассы

Русский химик А. М. Бутлеров в середине XIX в. первым разработал те основные принципы, на которых впоследствии были основаны методы получения полимеров из низкомолекулярных органических соединений. Эти работы оказали огромное влияние на дальнейшее развитие химии полимеров.

Еще в 1909 г. русский химик С. В. Лебедев связал молекулы бутадиена — газообразного продукта, вырабатываемого из спирта, в длинные цепочки и получил полимер, сходный с естественным каучуком. Но организовать промышленное производство синтетического каучука (СК) в России удалось лишь после Великой Октябрьской социалистической революции, в 1931—1932 гг.

В начале XX в. резко изменилось отношение химиков к некоторым веществам, до этого только загрязнявшим лабораторную посуду. Бельгийский химик Л. Бакеланд, работавший в США, заинтересовался вязкой жидкостью, образующейся в результате реакции между давно известными органическими веществами — фенолом и формальдегидом, растворенными в воде. Однажды, нагревая эту смесь под давлением, он получил твердое и прозрачное вещество, которое прекрасно выдерживало высокую температуру, было очень устойчиво к действию химических веществ, хорошо противостояло механическому износу, не боялось влаги и в довершение всего оказалось великолепным изолятором электрического тока. Новый материал в честь его создателя был назван *бакелитом*. Бакелит стал первым продуктом новой отрасли промышленности — индустрии пластических масс.

Нагревая под давлением формальдегид с мочевиной или анилином, химики получили ряд пластмасс уже с иными, чем у бакелита, свойствами. Из этих первых промышленных полимеров, созданных, так сказать, на ощупь, изготовляли различные предметы, применяемые в быту и в промышленности. Но законов, управляющих их образованием и поведением, никто из первых исследователей не открыл. Изучением полимеров нужно было заняться глубоко и всесторонне.

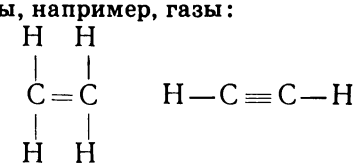
Как получают молекулы-гиганты

Одно дело — разгадать, как устроен природный полимер, а другое — искусственно воспроизвести его или похожий на него полимер, т. е. «собрать» составляющие его звенья в нужную длинную цепочку.

Химик, совершающий такое волшебство, чем-то напоминает строителя. Но вместо одинаковых реально осязаемых кирпичей у химиков множество невидимых кирпичиков и даже целые готовые блоки из них — самых различных размеров и формы, образованные из молекул исходных органических веществ — мономеров.

Не все органические вещества способны образовывать полимеры. Органические соединения, состоящие лишь из атомов углерода, обрамленных с нескольких сторон атомами водорода, называют *предельными* или *насыщенными углеводородами*. Сами по себе молекулы этих веществ соединяться в еще более длинные цепочки не могут.

Однако в молекулах некоторых углеводородов атомы углерода связаны между собой двойными и даже тройными связями. Такие углеводороды называют *непредельными* или *ненасыщенными*. В химическом отношении они намного активнее насыщенных. Таковы, например, газы:

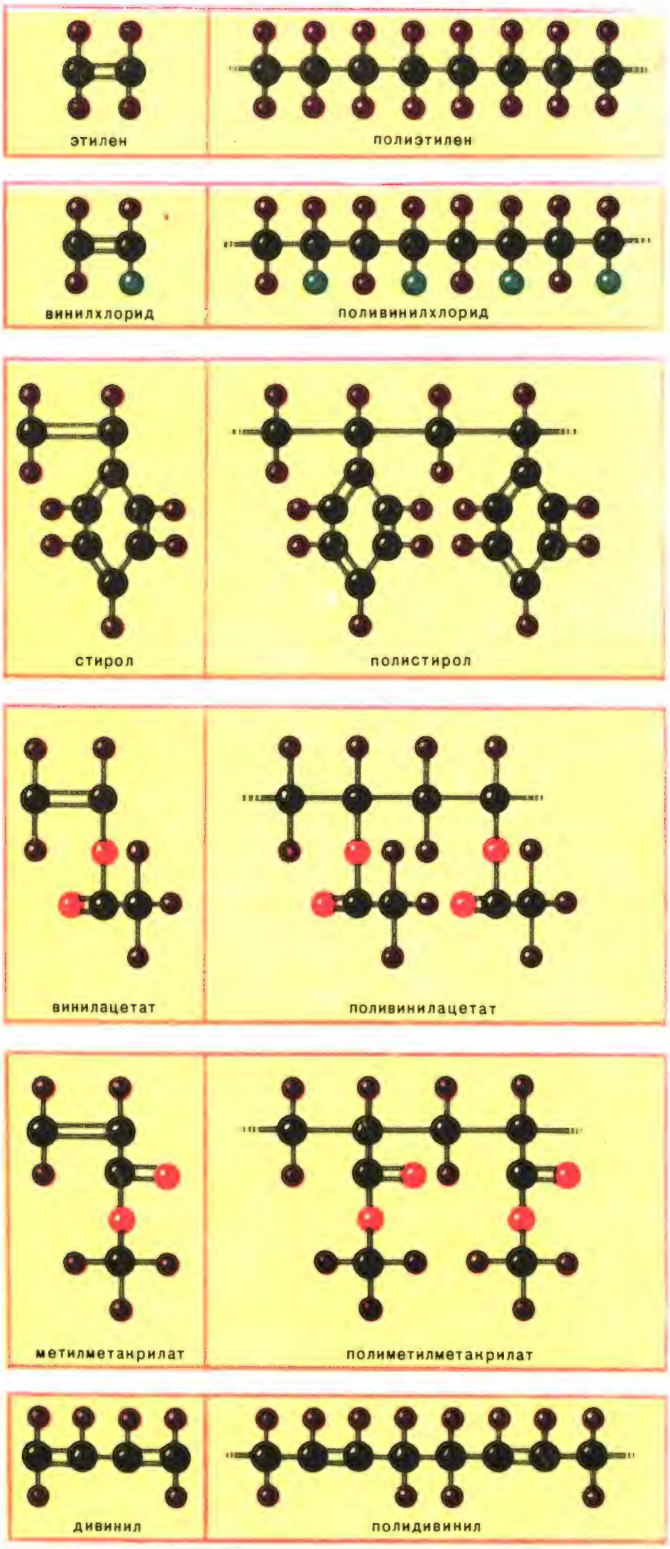


этилен C_2H_4 ацетилен C_2H_2

Особенность молекул непредельных углеводородов заключается в том, что при определенных условиях одна из связей между атомами углерода может быть разорвана, и тогда молекула приобретает способность присоединять к себе одну за другой множество таких же молекул. Образуется одна гигантская молекула-цепочка, состоящая из нескольких десятков и сотен тысяч метиленовых групп CH_2. Таким путем появился на свет *полиэтилен*. Из газа было получено твердое вещество, обладающее большой механической прочностью.

Благодаря своим исключительным свойствам в промышленности, изготовляющей электрические кабели и провода, 1 т легкого полиэтилена заменяет 3 т очень дорогого свинца. Из полиэтилена можно изготовлять и всевозможную тару: химическую, обычную посуду и даже огромные цистерны для перевозки жидкостей. Полиэтилен — отличный мате-

Некоторые мономеры и соответствующие им полимеры.

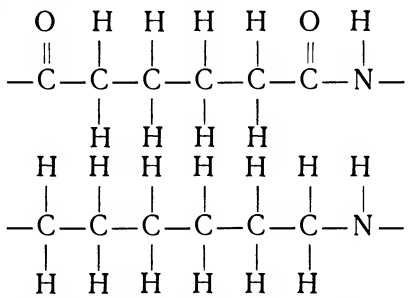


Дно будущего оросительного канала выстилают полимерной пленкой, чтобы вода не уходила в землю.

На снимке: строительство Каховского оросительного канала.

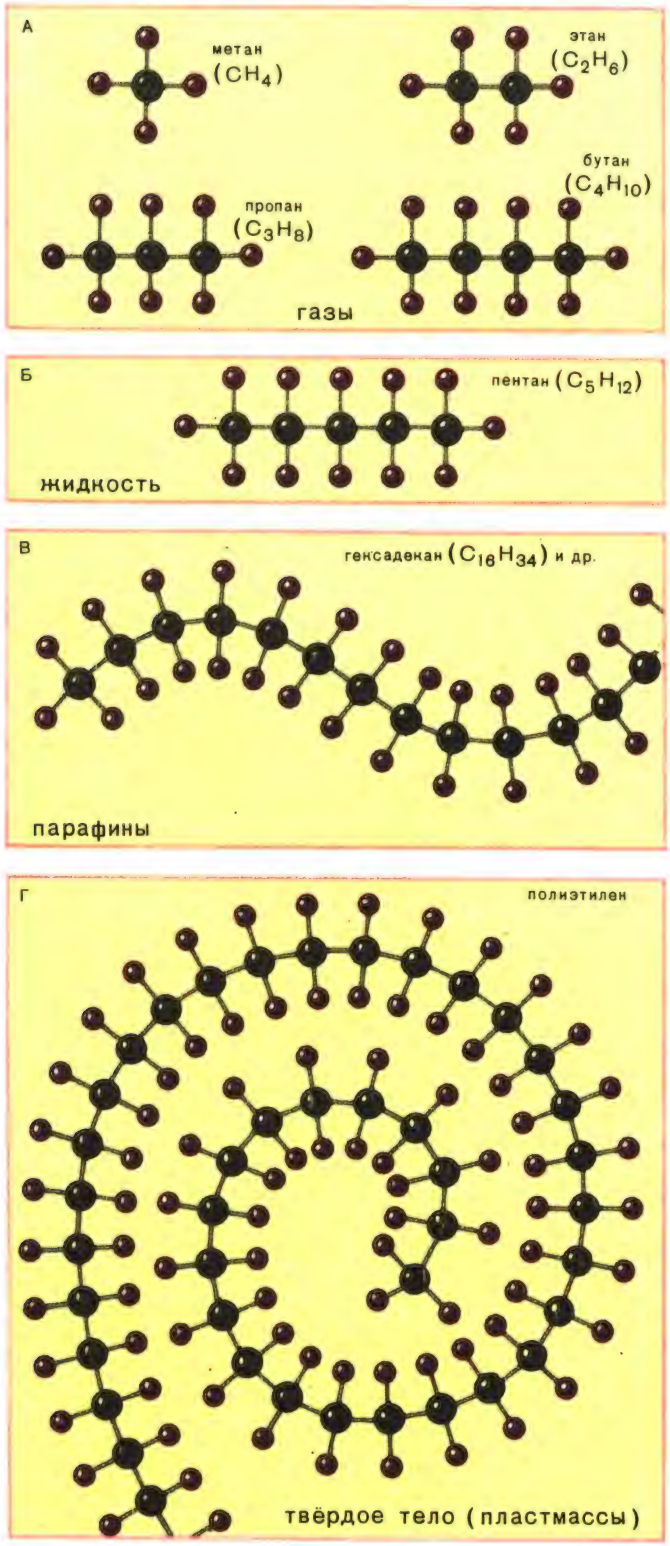
риал для внутренней облицовки металлических труб, применяемых для перекачки кислот и других жидкостей, разъедающих металлы. Там, где стальные трубы приходилось менять каждые два месяца, трубы, облицованные полиэтиленом, служат больше трех лет. Из полиэтилена изготовляют и сплошные трубы — прочные, гибкие, практически «вечные».

Не все большие молекулы представляют собой цепочки, состоящие только из атомов углерода. Последовательность атомов углерода время от времени может прерываться введением атома азота. Последний отличается от углерода тем, что может присоединять только три атома водорода. Поэтому, войдя в состав такой цепи, атом азота присоединит к себе только один атом водорода, а не два, как атом углерода. Если еще при этом заменить два атома водорода у одного из углеродных атомов одним атомом кислорода, получается молекула полиамидного соединения — нейлона:



По химической структуре подобные соединения (капрон, анид, энант) родственны природным белковым волокнам — шерсти и шелку, но превосходят их высокой механической прочностью. Наиболее известен капрон, из которого делают почти невесомые

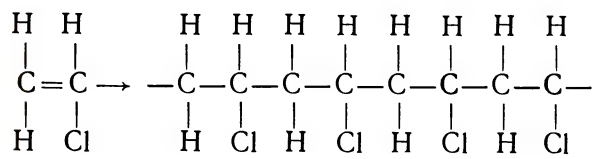
Способностью соединяться в длинные цепочки (полимеры) обладают атомы углерода, с которыми соединены несколько атомов водорода,— так называемые углеводороды. Если в такой молекуле содержится менее 5 атомов углерода, то вещество обычно имеет газообразную форму (*А*); от 5 до 11 атомов углерода — это уже жидкости (*Б*); более 12 атомов углерода — твердые вещества (*В*). Цепочки из десятков и сотен тысяч атомов углерода образуют высокопрочные пластические вещества (*Г*).



чулки, прочные мужские носки, шубы и многое другое. Важное значение имеет и техническое применение капрона. Изготовленные из него морские канаты в несколько раз прочнее самых лучших пеньковых, очень эластичны и не рвутся при рывках. Рыболовные сети из капрона не намокают и не гниют. Делают из него и особенно прочную ткань для автомобильных и самолетных шин — шинный корд, резервуары для нефти вместимостью до 600 т. Караваны таких «танкеров» можно буксировать по воде одним судном. Капроновые шестерни меньше изнашиваются, чем металлические, и почти бесшумны в работе.

Из соединения терефталевой кислоты и этиленгликоля получается полиэфирная смола, из которой вырабатывается синтетическое волокно лавсан. Названо волокно по первым буквам Лаборатории высокомолекулярных соединений Академии наук СССР, где оно впервые было получено. Это белоснежное и мягкое, как пух, шелковистое волокно, по внешнему виду напоминает первоклассную шерсть, а по своим качествам значительно превосходит ее. Лавсан не боится кислот и щелочей, это самое термостойкое из волокон, не разрушающееся на свету. Из него делают высокопрочный шинный корд, невоспламеняющиеся транспортерные ленты (особенно нужны они во взрывоопасных угольных шахтах), приводные ремни, химические фильтры, изоляцию. Из него вырабатывают не пропускающие воду брезенты, пожарные рукава, складные лодки и байдарки, палатки, шланги, паруса, специальную одежду для рыбаков и трактористов. Пленки из лавсана почти не пропускают газа и более прочны, чем алюминиевая фольга одинаковой с ним толщины. Их широко применяют для изоляции электрических проводов, упаковки пищевых товаров, для изготовления баллонов, в которых хранят газы и жидкости, для производства немнущихся тканей.

Как мы уже говорили, простейший мономер — *этилен*. Однако столь же простым мономером может быть также молекула этилена, в которой один из атомов водорода замещен каким-либо другим атомом или группой атомов. Если в ней один из четырех атомов водорода заменен атомом хлора, то получается уже другой мономер — *винилхлорид*, из которого образуется полимер *поливинилхлорид* — материал, имеющий тысячи применений:



По сравнению с полиэтиленом поливинилхлорид обладает меньшей горючестью, большей жесткостью и высокой механической прочностью, особенно при ударных нагрузках. Из пропитанной им ткани изготовляют прочные ремни для шахтных транспортеров, плитки для полов, водопроводные трубы и множество других изделий. Поливинилхлорид с успехом заменяет металлы. 1 т этого полимера сберегает 6 т стали.

В южных районах, особенно в Средней Азии, вода очень ценится. Для орошения полей вода поступает через сильно разветвленную сеть ирригационных сооружений. При этом значительная часть воды просачивается сквозь стенки многочисленных каналов и уходит в землю, не дойдя до посевов. Но если стенки каналов выстлать тонкой поливинилхлоридной пленкой, утечка воды практически прекратится.

Замена в молекуле этилена одного из атомов водорода группой CN — приводит к образованию мономера акрилонитрила ($CH_2 = CH - CN$). Из него получается полиакрилонитрил — материал для изготовления синтетических волокон (орлон, нитрон, анилан). Нити из нитрона в четыре раза прочнее натуральной шерсти. Меха, ковры, одеяла, перчатки, носки, свитера из нитрона так же теплы и мягки, как и сделанные из верблюжьей шерсти. Изделия из него после стирки не нужно гладить. Они не теряют своей первоначальной формы.

Цепочка полимера, «собранного» из многих мономеров, в свою очередь, может принять три различные формы. Если боковые группы Cl, CN, CH_3 и другие «смотрят» в разные стороны, то такие полимеры называют *атактическими*. Если все боковые группы «направлены» в какую-либо одну сторону, то цепочки легко укладываются параллельно одна другой и способны образовывать полимеры, напоминающие вещества с частично кристаллической структурой. Их называют *изотактическими*. Наконец, полимеры, боковые группы которых хотя и располагаются по обеим сторонам, но в каком-то определенном порядке чередования, такие полимеры называют *синдиотактическими*.

Полимеры могут состоять не из одинаковых, а из разных мономеров, которые также соединяются один с другим в цепочки в полном беспорядке или в каком-то определенном порядке. У таких полимеров в качестве боковых отростков на месте отдельных атомов или групп атомов могут быть присоединены мономерные и даже полимерные молекулы.

Мы видим, какое огромное количество вариантов цепочек можно составить, имея в своем распоряжении столь богатые возможности, комбинировать порядок расположения атомов и групп атомов в пределах мономеров, а сами мономеры — в цепочке всего полимера! И каждое изменение в структуре полимера приводит к определенному изменению механических или иных его свойств.

«Швейная фабрика» гигантских молекул

Молекулы-мономеры сами собой в длинные цепочки не соединяются. Чтобы заставить их соединяться в полимер, нужно «ввернуть» в молекулу какие-то особые «крючочки» и «петельки». Для этого существуют две основные химические реакции: *поликонденсация* и *полимеризация*. Эти реакции могут протекать при различных условиях: при нагревании или при очень низких температурах; при высоких или при низких давлениях и в присутствии катализаторов-инициаторов. Только в результате столь энергичных воздействий исходные мономеры перестраиваются, а расположенные на их концах атомы приобретают способность связываться, сцепляться с другими атомами, как сцепляется на сортировочной станции поезд: вагон за вагоном.

Поликонденсация. Процесс поликонденсации — сложная химическая реакция, в ходе которой от так называемых *функциональных групп*, расположенных на концах мономеров, отщепляются не очень прочно удерживаемые ими отдельные атомы или даже их целые группы. Этим поликонденсация отличается от полимеризации, при которой исходные вещества превращаются в конечный продукт без всяких «отходов».

К таким функциональным группам в молекулах органических веществ относятся аминогруппа NH_2, от которой легко отрывается атом водорода, и карбоксильная группа COOH, от которой отрывается уже гидроксильная группа OH. Когда молекула с карбоксильной группой на одном или на обоих концах встречается с молекулой, наделенной аминогруппой, тоже на одном или на обоих концах, то отрывающийся от аминогруппы атом водорода получает возможность соединиться с группой OH, отрывающейся от карбоксильной группы. Образуется молекула воды. При этом у первой молекулы освобождается связь при атоме углерода, а у второй — при атоме азота. Через эти связи молекулы и получают возможность смыкаться друг с другом в длинные цепочки.

Если у каждого исходного мономера лишь одна функциональная группа, то попарным соединением

друг с другом этих молекул все и кончается. Такой тип химической реакции называется *конденсацией*. Если же мономер содержит не менее двух функциональных групп, появляется возможность последовательного присоединения к получающейся цепочке друг за другом все новых и новых звеньев. Это уже поликонденсация.

Поликонденсация идет сравнительно медленно и, кроме того, не позволяет «выращивать» очень длинные молекулы. К счастью, для создания многих полимеров вполне достаточно молекул с молекулярной массой от 10 000 до 20 000.

Методом поликонденсации получают смолы, применяемые как связующие вещества при производстве фанеры, электроизоляционных изделий, плит и изделий из прессованных древесных опилок. Именно поликонденсация дает полимеры, из которых получаются исключительно прочные волокна.

Полимеризация. В процессе полимеризации получаются гигантские молекулы-цепочки из сотен тысяч и даже миллионов составных звеньев. Если в поликонденсации участвуют молекулы и на концах у них заранее заготовлены «крючочки», с помощью которых они соединяются в цепочки полимера не сразу, а друг за другом, то в процессе полимеризации эти «крючочки» создаются все одновременно лишь в тот момент, когда каждый мономер становится на свое место в цепочке.

Не все мономеры сразу, без предварительной подготовки, пригодны для создания полимеров. Чаще всего их приходится предварительно перестраивать и только после этого приступать к «сшиванию» в длинные цепочки.

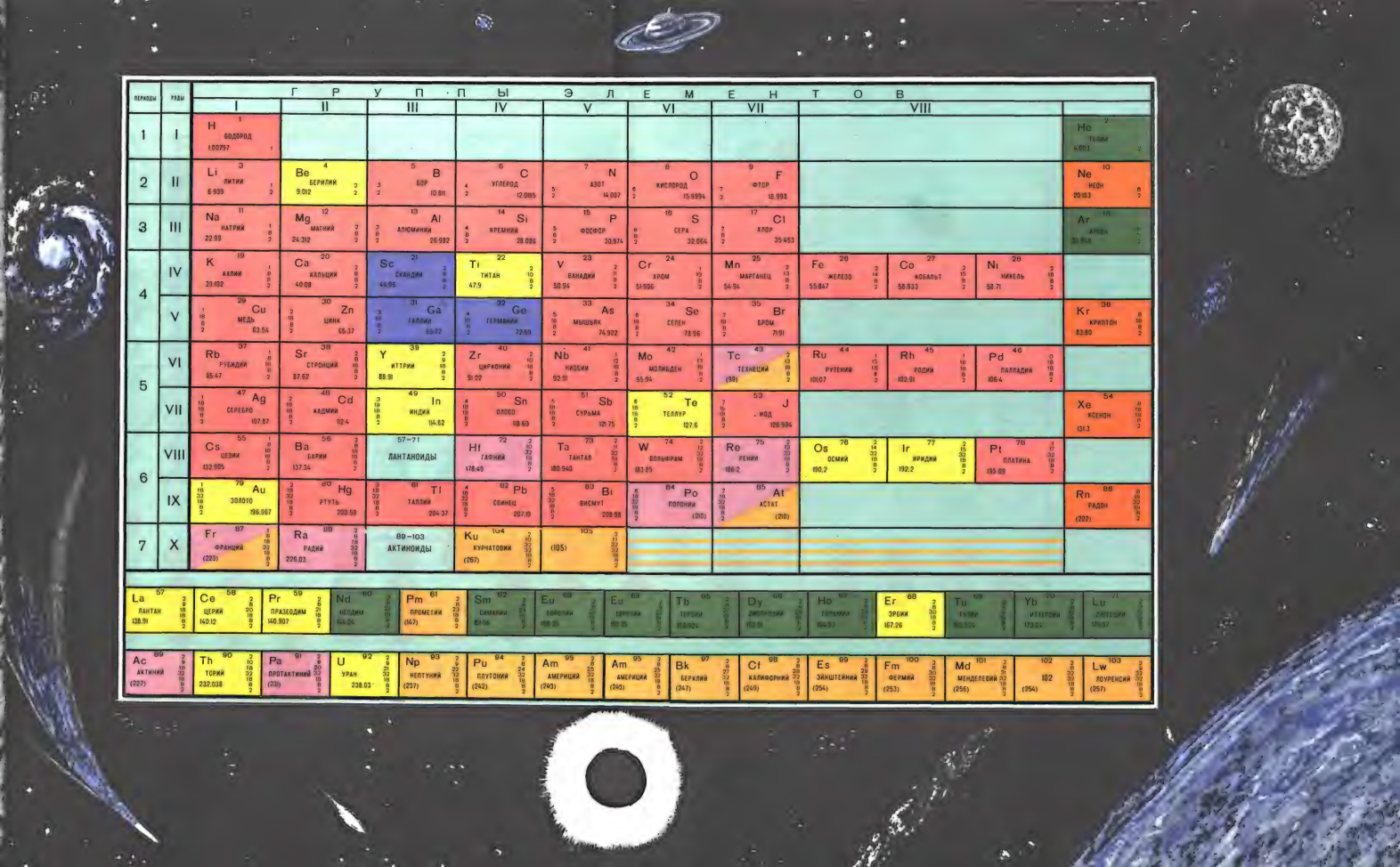
Как все это происходит, можно показать на примере создания синтетической пластической массы политетрафторэтилена, или фторопласта (тефлона). Это один из самых сложных процессов. Он наглядно показывает методы и приемы, к каким приходится прибегать современной химии высокомолекулярных соединений (см. стр. 482 «Синтез фторопласта»).

Зная законы образования полимеров, можно изменять свойства высокомолекулярных соединений совсем уж необычными способами. Допустим, в полимер, не обладающий высокой температурной стойкостью, удалось ввести еще один теплостойкий мономер, который нарушил первоначальную однообразную структуру цепочки. В результате получился так называемый *сополимер*, т. е. как бы двойной полимер, обладающий уже высокой теплостойкостью. Чередуя определенные количества мономеров одного вида с тем или иным числом мономеров другого вида, можно получить сополимеры с самыми различными, порой даже неожиданными свойствами, например с очень большой сопротивляемостью различным растворителям, высокой прочностью, гибкостью, растяжимостью, долговечностью.

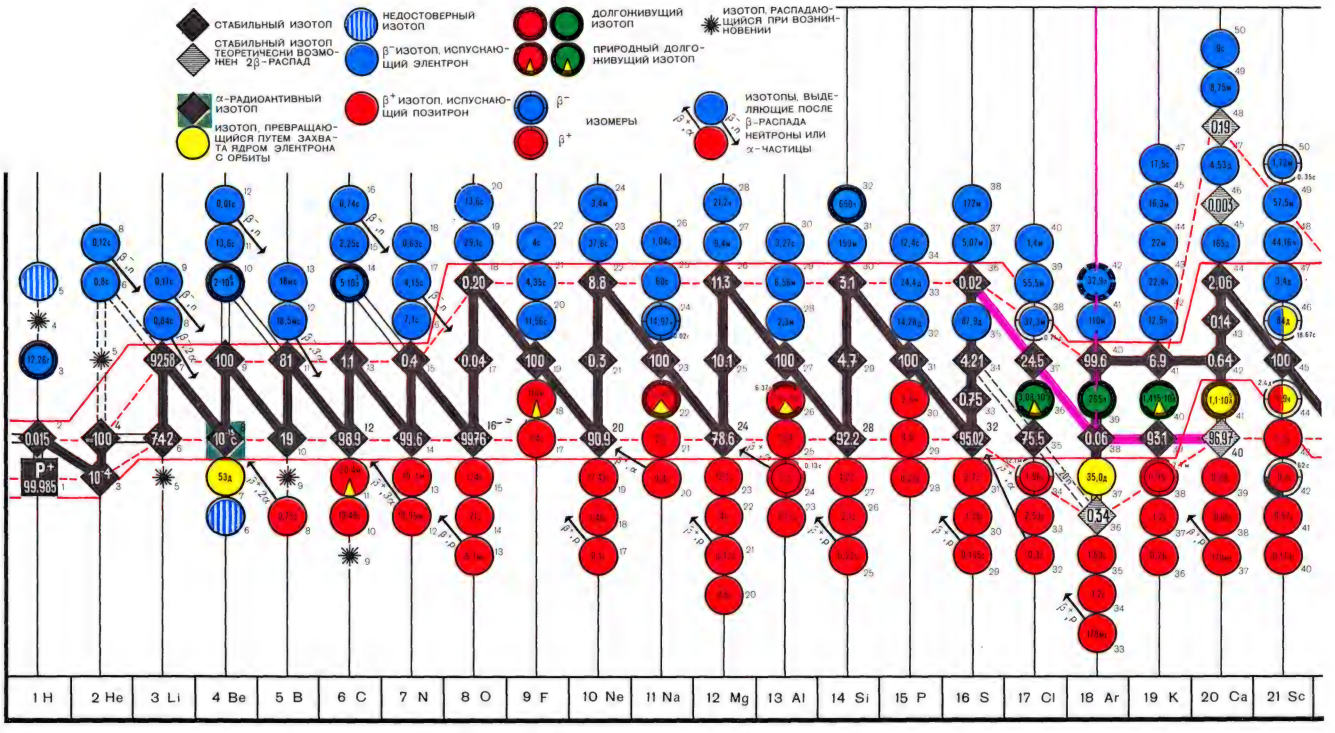
Для создания полимеров применяют и методы прививки примерно так, как это делается в садоводстве (см. рис. на стр. 483). К какому-либо мономеру, входящему в качестве звена в цепочку основного полимера, сбоку присоединяется мономер, являющийся

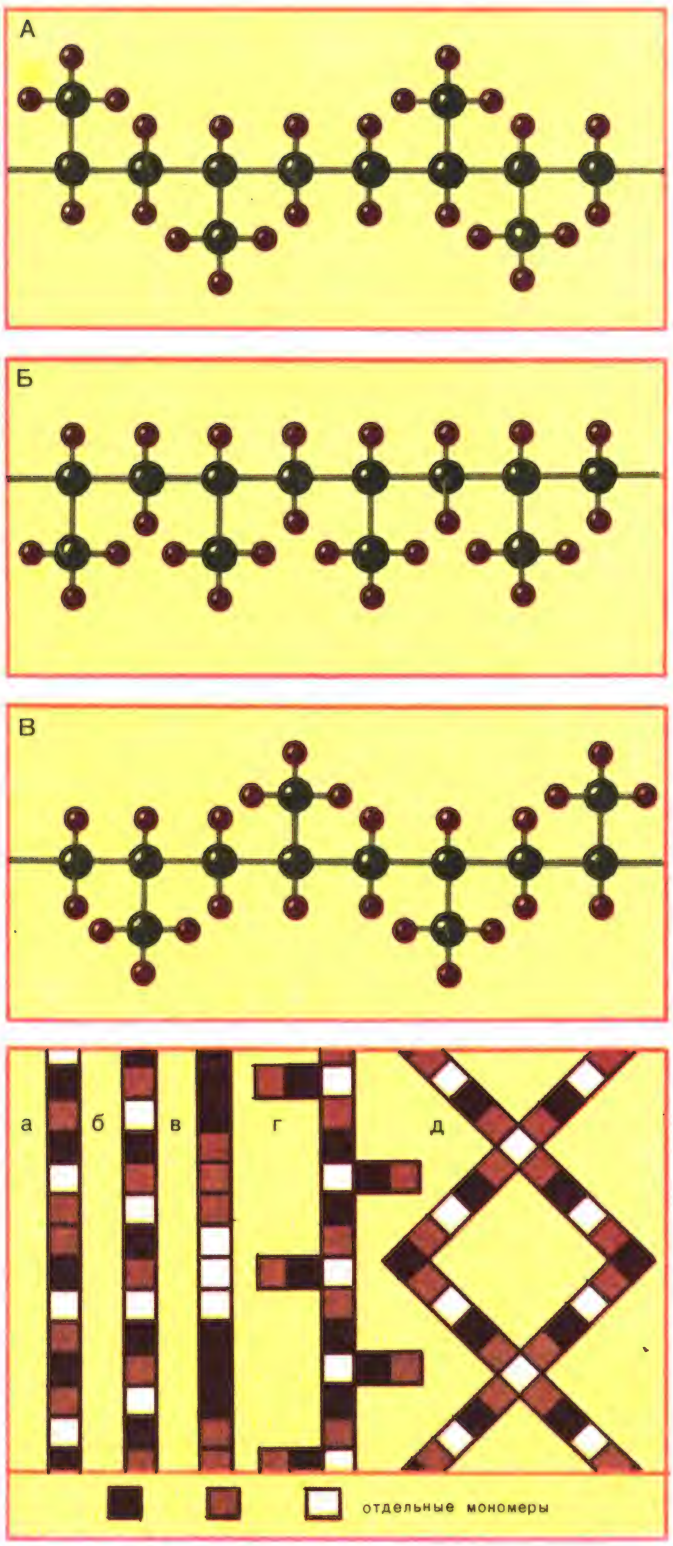
Сергей Васильевич Лебедев (1874—1934)

Советский химик-органик, академик. Основные работы Лебедева посвящены изучению процессов полимеризации непредельных соединений и являются продолжением исследований Бутлерова в этом направлении. В 1910 г. он впервые получил каучукоподобный продукт из бутадиена (дивинила), в 1926—1928 гг. вместе с сотрудниками разработал признанный лучшим метод получения натрий-бутадиенового каучука (СКБ), основанный на получении из спирта дивинила с последующей полимеризацией его на металлическом натрии. Впервые в мире на основе этого метода в 1932 г. в нашей стране было создано промышленное производство синтетического каучука. Явился создателем научной школы советских химиков, работающих в области синтетического каучука и высокомолекулярных соединений.


ПЕРИОДЫ
РЯДЫ
Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В
I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
1 I
2 II
3 III
4 IV
V
5 VI
VII
6 VIII
IX
7 X
1 H 1 ВОДОРОД 1.00797
2 He 2 ГЕЛИЙ 4.003
3 Li 2 1 ЛИТИЙ 6.939
4 Be 2 2 БЕРИЛЛИЙ 9.012
5 B 2 3 БОР 10.811
6 C 2 4 УГЛЕРОД 12.0115
7 N 2 5 АЗОТ 14.007
8 O 2 6 КИСЛОРОД 15.9994
9 F 2 7 ФТОР 18.998
10 Ne 2 8 НЕОН 20.183
11 Na 2 8 1 НАТРИЙ 22.99
12 Mg 2 8 2 МАГНИЙ 24.312
13 Al 2 8 3 АЛЮМИНИЙ 26.982
14 Si 2 8 4 КРЕМНИЙ 28.086
15 P 2 8 5 ФОСФОР 30.974
16 S 2 8 6 СЕРА 32.064
17 Cl 2 8 7 ХЛОР 35.453
18 Ar 2 8 8 АРГОН 39.944
19 K 2 8 8 1 КАЛИЙ 39.102
20 Ca 2 8 8 2 КАЛЬЦИЙ 40.08
21 Sc 2 8 9 2 СКАНДИЙ 44.96
22 Ti 2 8 10 2 ТИТАН 47.9
23 V 2 8 11 2 ВАНАДИЙ 50.94
24 Cr 2 8 13 1 ХРОМ 51.996
25 Mn 2 8 13 2 МАРГАНЕЦ 54.94
26 Fe 2 8 14 2 ЖЕЛЕЗО 55.847
27 Co 2 8 15 2 КОБАЛЬТ 58.933
28 Ni 2 8 16 2 НИКЕЛЬ 58.71
29 Cu 2 8 18 1 МЕДЬ 63.54
30 Zn 2 8 18 2 ЦИНК 65.37
31 Ga 2 8 18 3 ГАЛЛИЙ 69.72
32 Ge 2 8 18 4 ГЕРМАНИЙ 72.59
33 As 2 8 18 5 МЫШЬЯК 74.922
34 Se 2 8 18 6 СЕЛЕН 78.96
35 Br 2 8 18 7 БРОМ 79.91
36 Kr 2 8 18 8 КРИПТОН 83.80
37 Rb 2 8 18 8 1 РУБИДИЙ 85.47
38 Sr 2 8 18 8 2 СТРОНЦИЙ 87.62
39 Y 2 8 18 9 2 ИТТРИЙ 88.91
40 Zr 2 8 18 10 2 ЦИРКОНИЙ 91.22
41 Nb 2 8 18 12 1 НИОБИЙ 92.91
42 Mo 2 8 18 13 1 МОЛИБДЕН 95.94
43 Tc 2 8 18 14 1 ТЕХНЕЦИЙ (99)
44 Ru 2 8 18 15 1 РУТЕНИЙ 101.07
45 Rh 2 8 18 16 1 РОДИЙ 102.91
46 Pd 2 8 18 18 ПАЛЛАДИЙ 106.4
47 Ag 2 8 18 18 1 СЕРЕБРО 107.87
48 Cd 2 8 18 18 2 КАДМИЙ 112.4
49 In 2 8 18 18 3 ИНДИЙ 114.82
50 Sn 2 8 18 18 4 ОЛОВО 118.69
51 Sb 2 8 18 18 5 СУРЬМА 121.75
52 Te 2 8 18 18 6 ТЕЛЛУР 127.6
53 J 2 8 18 18 7 ИОД 126.904
54 Xe 2 8 18 18 8 КСЕНОН 131.3
55 Cs 2 8 18 18 8 1 ЦЕЗИЙ 132.905
56 Ba 2 8 18 18 8 2 БАРИЙ 137.34
57–71 ЛАНТАНОИДЫ
72 Hf 2 8 18 32 10 2 ГАФНИЙ 178.49
73 Ta 2 8 18 32 11 2 ТАНТАЛ 180.948
74 W 2 8 18 32 12 2 ВОЛЬФРАМ 183.85
75 Re 2 8 18 32 13 2 РЕНИЙ 186.2
76 Os 2 8 18 32 14 2 ОСМИЙ 190.2
77 Ir 2 8 18 32 15 2 ИРИДИЙ 192.2
78 Pt 2 8 18 32 16 1 ПЛАТИНА 195.09
79 Au 2 8 18 32 18 1 ЗОЛОТО 196.967
80 Hg 2 8 18 32 18 2 РТУТЬ 200.59
81 Tl 2 8 18 32 18 3 ТАЛЛИЙ 204.37
82 Pb 2 8 18 32 18 4 СВИНЕЦ 207.19
83 Bi 2 8 18 32 18 5 ВИСМУТ 208.98
84 Po ПОЛОНИЙ (210)
85 At АСТАТ (210)
86 Rn 2 8 18 32 18 8 РАДОН (222)
87 Fr 2 8 18 32 18 8 1 ФРАНЦИЙ (223)
88 Ra 2 8 18 32 18 8 2 РАДИЙ 226.03
89–103 АКТИНОИДЫ
104 Ku 2 8 18 32 32 10 2 КУРЧАТОВИЙ (267)
105 (105) 2 8 18 32 32 11 2
57 La 2 8 18 18 9 2 ЛАНТАН 138.91
58 Ce 2 8 18 20 8 2 ЦЕРИЙ 140.12
59 Pr 2 8 18 21 8 2 ПРАЗЕОДИМ 140.907
60 Nd НЕОДИМ 144.24
61 Pm ПРОМЕТИЙ (147)
62 Sm САМАРИЙ 150.35
63 Eu ЕВРОПИЙ 151.96
64 Eu ЕВРОПИЙ 157.25
65 Tb ТЕРБИЙ 158.924
66 Dy ДИСПРОЗИЙ 162.51
67 Ho ГОЛЬМИЙ 164.93
68 Er 2 8 18 30 8 2 ЭРБИЙ 167.26
69 Tu ТУЛИЙ 169.934
70 Yb ИТТЕРБИЙ 173.04
71 Lu ЛЮТЕЦИЙ 174.97
89 Ac 2 8 18 32 18 9 2 АКТИНИЙ (227)
90 Th 2 8 18 32 18 10 2 ТОРИЙ 232.038
91 Pa 2 8 18 32 20 9 2 ПРОТАКТИНИЙ (231)
92 U 2 8 18 32 21 9 2 УРАН 238.03
93 Np 2 8 18 32 22 9 2 НЕПТУНИЙ (237)
94 Pu 2 8 18 32 24 8 2 ПЛУТОНИЙ (242)
95 Am 2 8 18 32 25 8 2 АМЕРИЦИЙ (243)
95 Am 2 8 18 32 25 8 2 АМЕРИЦИЙ (243)
97 Bk 2 8 18 32 27 8 2 БЕРКЛИЙ (247)
98 Cf 2 8 18 32 28 8 2 КАЛИФОРНИЙ (249)
99 Es 2 8 18 32 29 8 2 ЭЙНШТЕЙНИЙ (254)
100 Fm 2 8 18 32 30 8 2 ФЕРМИЙ (253)
101 Md 2 8 18 32 31 8 2 МЕНДЕЛЕВИЙ (256)
102 2 8 18 32 32 8 2 (254)
103 Lw 2 8 18 32 32 9 2 ЛОУРЕНСИЙ (257)

НАЧАЛО ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ АТОМНЫХ ЯДЕР





Структуры полимерных цепочек: *А* — атактические; *Б* — изотактические; *В* — синдиотактические. При этом мономеры в цепях могут располагаться различно: *а* — в полном беспорядке; *б* — в какой-либо строгой последовательности; *в* — группами (блоками); *г* — присоединением боковых веточек; *д* — перекрещивающимися ветвями.

начальным звеном цепочки другого полимера. Для такой операции из молекулы-мономера тем или иным способом удаляют какой-либо из атомов, обычно атом водорода, а на освободившиеся места наращивают боковые цепочки. Прямолинейная гигантская молекула начинает ветвиться, как дерево. Но ветви эти имеют особый, отличный от нее состав, и весь полученный таким путем полимер приобретает совершенно новые свойства.

Так можно, например, «привить» ветку полистирола к цепочке молекул целлюлозы. Последняя жадно впитывает воду, а полистирол отталкивает ее. В результате материалы, изготовленные из такой «привитой» целлюлозы, приобретают способность отталкивать воду. Это весьма важно для тканей, идущих на изготовление палаток, плащей, складных лодок и т. д. Сколько огорчений и неприятностей вызывает вид помятой одежды, плохо выглаженного белья, сколько полезного времени отнимает их утюжка! «Прививая» молекулы акрилонитрила к молекулам целлюлозы, можно получать волокна для немнущихся тканей.

Некоторые полимеры обладают ценными свойствами полупроводников. Такие вещества очень нужны для современной радиоэлектроники, приборостроения, космической навигации.

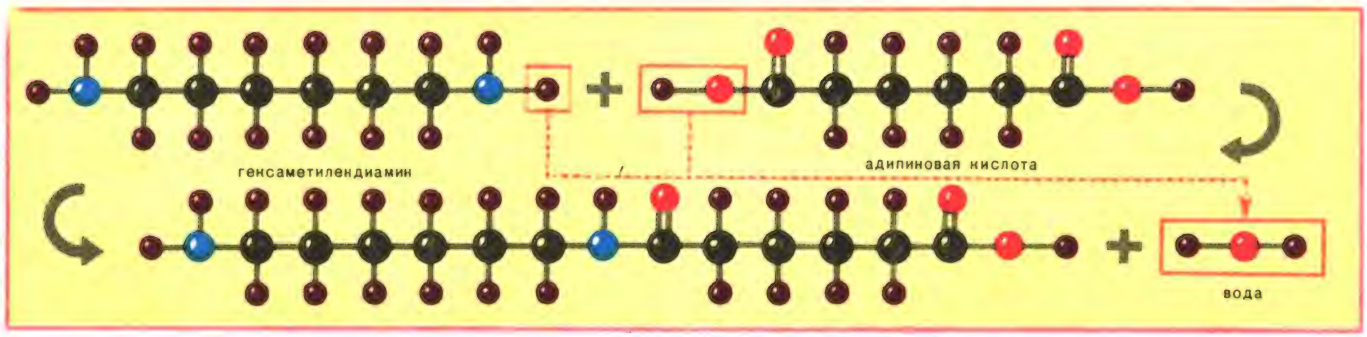
Секрет прочности

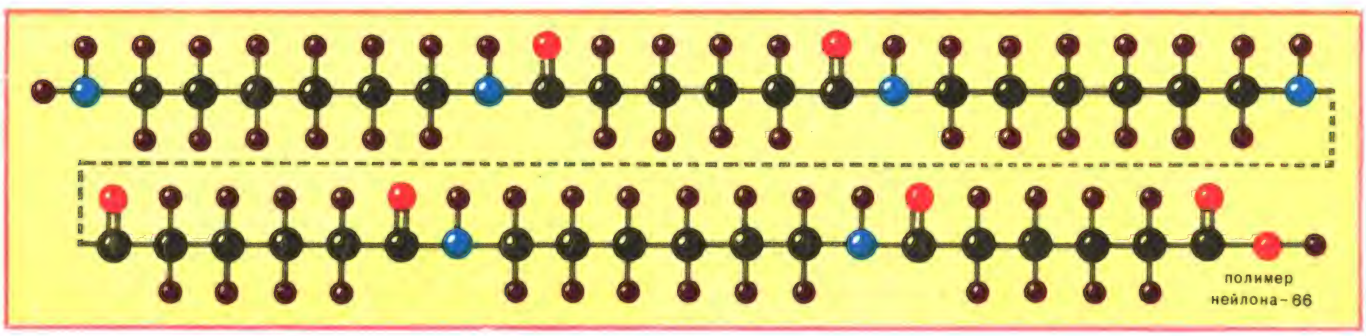
Молекулы органических веществ, образовав длинные цепочки из десятков и сотен молекул-мономеров, приобретают необычную прочность. Происходит это из-за исключительной «цепкости» атомов углерода. Возьмем цепочку уже знакомого нам полиэтилена. Ее метиленовые звенья прочно «сшиты» между собой валентными связями углерода. В свою очередь, метиленовые звенья двух соседних молекул тоже притягиваются друг к другу, но довольно слабо. Чтобы разорвать валентную связь между двумя углеродными атомами, нужно затратить примерно в 160 раз больше энергии, чем для того, чтобы переместить один относительно другого два соседних метиленовых звена. Поэтому оторвать одну от другой обычные малые молекулы, например расплавить вещество, которое они образуют, куда легче, чем разорвать саму молекулу.

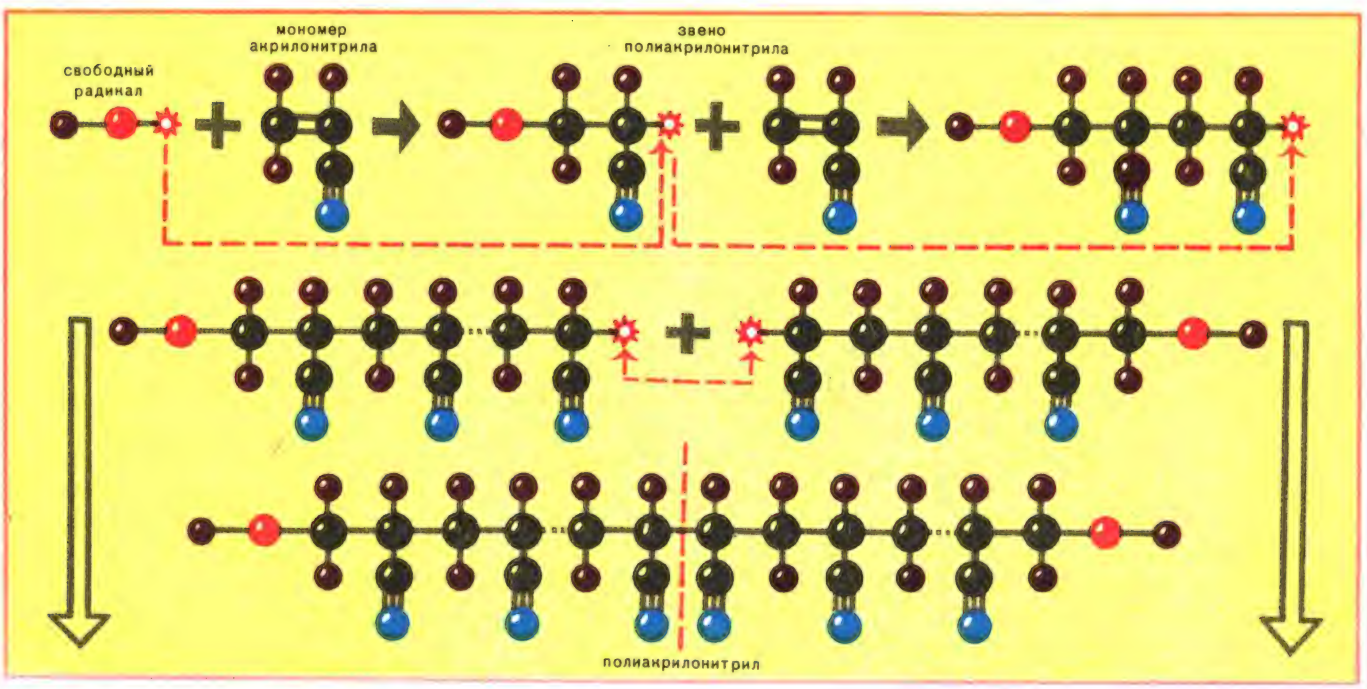
А вот в гигантской молекуле все происходит иначе. Чтобы переместить две такие молекулы друг относительно друга, нужно силу притяжения двух ме-

Пример процесса поликонденсации. Две молекулы гексаметилендиамина и адипиновой кислоты соединяются в цепочку. При этом выделяется молекула воды Н—О—Н. В результате непрерывного роста цепочки образуется полимер нейлона-66.

Пример процесса полимеризации (рис. внизу). Свободный радикал Н—О, получаемый при расщеплении перекиси водорода, имеет одну свободную валентную связь (обозначена красной звездочкой), через которую он и соединяется с мономером акрилонитрила. При этом свободная валентная связь перемещается на конец мономера. Мономер акрилонитрила получает возможность присоединить к себе другой такой же мономер, а переместившаяся на конец этого мономера свободная валентная связь — присоединить к образующейся цепочке третий мономер и т. д. Процесс непрерывного увеличения длины цепочки мономера прекращается лишь тогда, когда две такие цепочки соединяются друг с другом своими свободными валентными связями.







тиленовых звеньев умножить на общее количество таких звеньев во всей цепочке полимера. А их может быть несколько десятков тысяч. В этом случае куда легче разорвать саму молекулу, чем оторвать друг от друга две молекулы полимера.

Цепочки полимеров могут располагаться прямолинейными параллельными пучками, вроде проводов в телефонном кабеле. Тогда вещество приобретает свойство прочных эластичных волокон или очень гибкого твердого тела. Если же молекулы свернуты в клубки, вещество приобретает способность сильно растягиваться и вновь сокращаться.

В зависимости от этого в них проявляются самые необычные и неожиданные сочетания физических свойств. Они могут одновременно счастливо сочетать в себе упругость, свойственную газообразным веществам, текучесть и несжимаемость, присущие жидкостям, сопротивляемость любому изменению формы, характерную для твердых тел.

Некоторые полимеры способны течь, как и жидкости, и одновременно обладают огромной вязкостью, в миллионы раз большей, чем очень вязкие вещества, например масла. При медленном механическом воздействии на них такие полимеры весьма податливы, легко деформируются и как бы текут. При более быстром воздействии они сопротивляются, как самая упругая резина, а при ударе ведут себя как твердое тело, т. е. не являются ни истинно упругими, ни настоящими вязкими телами.

Стекло, кожа или резина?

Все полимеры можно разделить на две большие группы: полимеры, имеющие аморфную структуру, такую, как, например, у стекла, и полимеры с частично кристаллической структурой.

В аморфных полимерах молекулярные цепочки переплетены друг с другом в самых причудливых комбинациях. Такие полимеры используют для получения различных веществ — от искусственной кожи и резины до органического стекла. Иначе говоря, они могут обладать свойствами и стекла, и резины, и кожи. Однако эти их свойства существуют только при обычной, комнатной температуре. Если же стекловидную пластмассу нагревать, то она становится сначала мягкой и гибкой, как кожа, затем приобретает свойства резины, а при дальнейшем нагревании окончательно теряет свою форму и превращается в тягучую вязкую жидкость.

Нужно заметить, что при нагревании полимеры никогда не переходят в парообразное состояние, как вода или другие жидкости. Этому препятствуют большая длина их молекул и сильное притяжение молекул друг к другу в расплавленной массе. Однако жидкий полимер — это не обычная жидкость. Его текучесть определяется не способностью каждой отдельной молекулы скользить вдоль другой, как у обычных жидкостей, а способностью всей совокупности отдельных звеньев длинных молекулярных цепочек скользить вдоль других. Следовательно, вязкость полимера зависит от длины его молекул.

Многие полимерные вещества в таком состоянии легко превратить в готовое изделие путем прессования. При выдавливании их через тончайшие отверстия получаются длинные нити, из которых затем изготовляют волокно и ткут ткани. Так ведут себя высокомолекулярные вещества с линейными или линейно разветвленными молекулами — *термопластичные полимеры*, т. е. такие, которые можно повторно размягчить и формовать в нужные изделия.

Иначе ведут себя *термореактивные полимеры*. При их нагревании между соседними молекулами образуются многочисленные связки, препятствующие взаимному скольжению цепочек полимера, и он необратимо твердеет.

Еще более частое расположение таких связок позволяет полимеру сохранять стекловидное состояние до температуры, при которой вместо размягчения сразу начинается его разложение. Так ведет себя при нагревании, например, бакелит.

Ко второй группе относятся полимеры, структура которых частично напоминает структуру кристаллических тел. Эти свойства приходятся на те участки полимера, где все короткие отрезки большого числа длинных молекул улеглись параллельно друг другу. Такие островки порядка в море беспорядка можно обнаружить при помощи рентгеновских лучей. Расположенные между ними звенья образуют аморфные участки полимера. Они служат как бы своеобразным клеем, скрепляющим мелкие кристаллики вещества полимера в твердое тело.

Свойства частично кристаллических полимеров изучены еще сравнительно мало. Установлено, что при повышении температуры они не приобретают свойств резины или кожи, утрачивая только хрупкость, но не твердость. Закристаллизовавшиеся участки не дают изделию изменить приданную ему форму. Твердость таких полимеров зависит от количества кристаллических участков. Однако аморфные участки придают веществу достаточную упругость, что особенно полезно в тех случаях, когда изделие подвергается ударным нагрузкам.

И в огне не горит...

Действие некоторых фантастических романов развертывается на планетах, где температура достигает нескольких сотен градусов Цельсия, где текут реки из расплавленного камня, а населяющие эти планеты живые существа выдерживают подобную жару.

Так могло, пожалуй, быть, если бы в составе живой материи — молекул органического вещества — место атомов углерода заняли атомы кремния. Все, что в природе связано с этим элементом, например кварц, песок, отличается высокой теплостойкостью.

Ученым удалось ввести в некоторые органические полимеры атомы кремния. Были получены полимеры-гибриды из углеводородных и кислородных соединений кремния, т. е. органических и неорганических веществ.

Современная промышленность нуждается в электрических двигателях, которые развивали бы большую мощность при очень небольших размерах. Этого можно достичь, увеличив силу электрического тока, пропускаемого через обмотки двигателей, что неизбежно ведет к их резкому перегреву. Были созданы совершенно новые изоляционные материалы, способные выдерживать очень высокую температуру.

В молекулах органических веществ атомы углерода соединяются валентными связями непосредственно друг с другом.

Кремнийорганические полимеры, в которых атомы кремния соединены между собой через атомы кислорода, называются *силоксанами* (от латинских слов «силициум» — кремний и «оксигениум» — кислород) или *силиконами* и имеют наибольшее применение по сравнению с другими кремнийорганическими полимерами (см. рис. на стр. 483).

Силоксаны, как и органические мономеры, способны соединяться в длинные цепочки. При этом в зависимости от исходного состава мономеров, а также по мере удлинения молекулы сначала получаются жидкие полимеры, затем вязкие смолы, потом каучуки и, наконец, твердые вещества. Если цепочки кремнийорганических полимеров связаны между собой еще и перемычками, они образуют структуру, отличающуюся особой прочностью, термостойкостью и способностью отталкивать воду.

Получать кремнийорганические полимеры можно поликонденсацией и полимеризацией. И хотя эта отрасль химии высокомолекулярных соединений зародилась относительно недавно, ее вклад в науку и технику уже сейчас весьма велик.

На основе кремнийорганических полимеров удалось создать краски, которые отлично предохраняют бетонные и каменные сооружения от действия влаги и разрушения. Силоксановыми и силиконовыми красками и лаками окрашивают нагреваемые до высоких температур печи, трубопроводы, которые раньше вообще не окрашивались, так как любые краски на них разлагались или выгорали.

Силиконовыми полимерами пропитывают ткани из стеклянного волокна. Эти ткани используют для изоляции деталей электрических машин. Электрический двигатель с кремнийорганической изоляцией обмотки работает даже будучи погруженным в воду.

Особенно удивительные качества приобретают каучуки, получаемые на основе кремнийорганических полимеров. Никакая автомобильная покрышка, изготовленная из естественного или синтетического каучука, не может выдержать в рабочих условиях изменения температуры от —60 до 130° С. А некоторые сорта силиконовой резины выдерживают нагрев даже до 300° С!

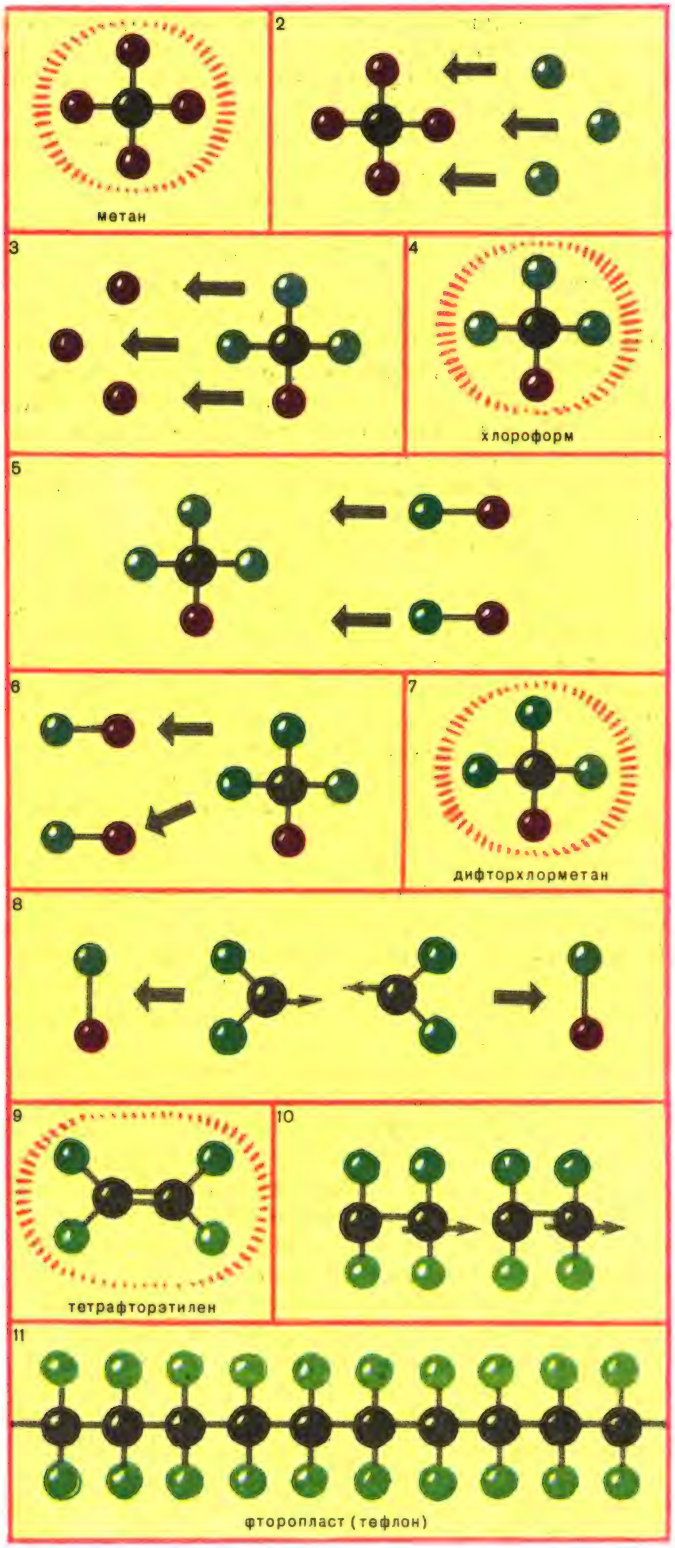
Кремнийорганический каучук очень теплостоек, но плохо переносит действие бензина и масла. Однако если в него ввести соответствующий органический мономер (например, акрилонитрил) и затем воздействовать сильным гамма-излучением, то к кремнийорганическому полимеру «привьются» боковые веточки полиакрилонитрила. Получится каучук и теплостойкий и устойчивый против действия бензина и масел.

Многие приборы (вентили, части насосов и т. д.), через которые проходят горячие и едкие жидкости, нуждаются в смазке. Никакие масла и жиры для этого непригодны. А водоотталкивающая, теплостойкая, прочно удерживающаяся на рабочей поверхности кремнийорганическая эмульсия прекрасно справляется с этой задачей.

Кремнийорганическая смазка, нанесенная тонким слоем на окна самолета или автомобиля, длительное время предохраняет стекло от смачивания водой, запотевания, обледенения. Если вылить воду из посуды, покрытой тонким слоем кремнийорганической смазки, на стенках не останется ни капли жидкости. Это очень важно для некоторых химических производств и лабораторных экспериментов.

Очень ценны кремнийорганические соединения в тех случаях, когда нужно предотвратить прилипание одного вещества к другому независимо от того, будут эти вещества в холодном, теплом или горячем состоянии. В литейном производстве долгое время был большой производственный брак оттого, что формовочная смесь прилипала к стенкам моделей, а расплавленный металл — к изложницам. Когда модели

Получение фторопласта.



стали покрывать силиконовыми смазками, брак был устранен. Применяются эти смазки и в производстве резиновых изделий: смазкой покрывают внутреннюю поверхность труб и аппаратуры, по которым проходят липкие жидкости. В кастрюлях и на сковородках, покрытых изнутри силиконовой пленкой, можно готовить пищу без масла — она не пригорит.

Ученых заинтересовала и такая проблема: если можно получить полимер, содержащий кремний, то почему бы не попытаться ввести в него и металлы?

Появились полимеры, в молекулы которых входят атомы других элементов — алюминия, фтора, бора, кобальта. Такие элементоорганические соединения

Синтез фторопласта

Химики задались целью получить новый материал с такими свойствами, каких не имело раньше ни одно природное вещество. Этот материал не должен бояться ни тепла, ни холода, обладать очень высокой химической стойкостью — не растворяться и не набухать в самых сильных кислотах и щелочах. Такой материал был создан и назван фторопластом.

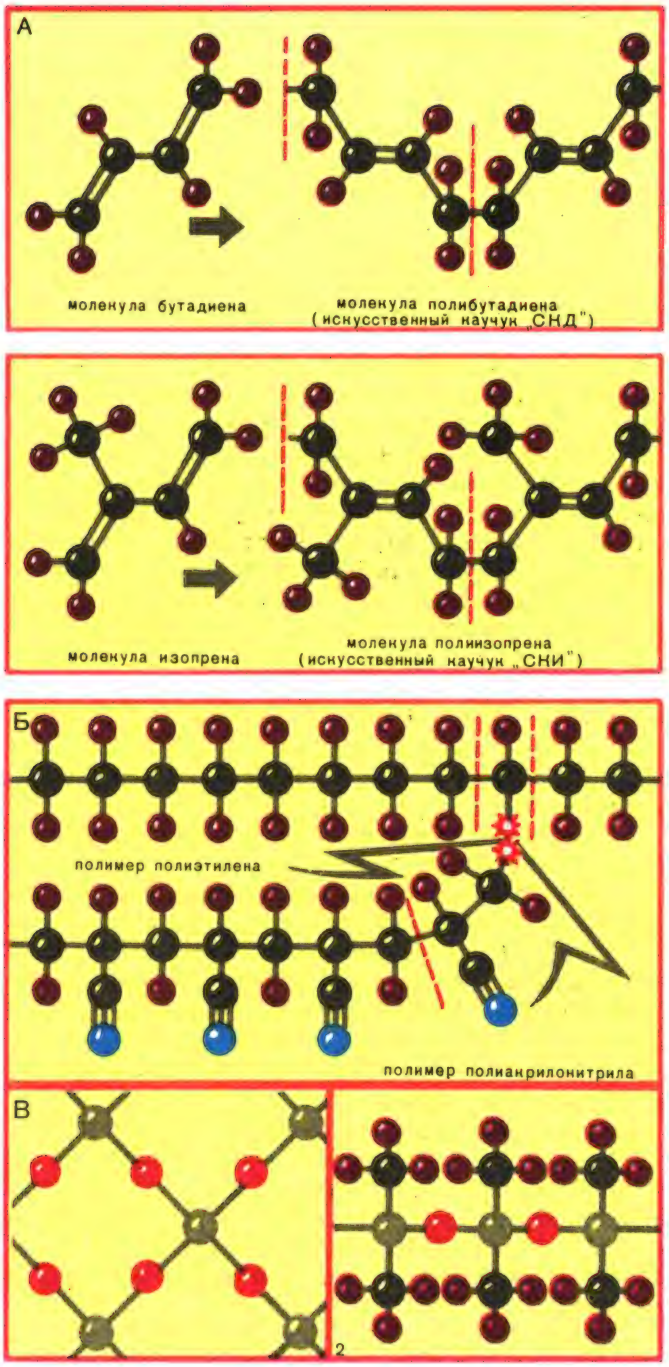
Исходным веществом служил газ метан CH_4. Чтобы получить из него фторопласт, атомы водорода надо заменить атомами фтора. Для этого метан подвергают действию хлора. В ходе химической реакции из молекулы метана удаляются три атома водорода, и на их место становятся три атома хлора. Вместо молекулы метана образуется молекула хлороформа $CHCl_3$. В ней еще сохраняется один атом водорода. Хлороформ подвергают воздействию фтористого водорода. В результате из молекулы хлороформа удаляются два атома хлора, и на их место становятся два атома фтора. Образуется молекула дифторхлорметана CHF_2Cl.

Итак, атомы фтора заняли в молекуле метана место атомов водорода. Сейчас уже можно приступить к созданию тетрафторэтилена — исходного мономера, необходимого для постройки цепочки задуманного полимера.

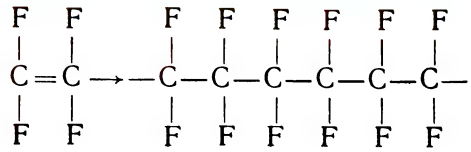
Для этого остается удалить из новой молекулы «вспомогательный» атом хлора и атом водорода, которые тяготеют друг к другу и стремятся соединиться в молекулу HCl. Но это может произойти лишь в ходе взаимодействия двух молекул дифторхлорметана, так как иначе в них остались бы свободные связи у атомов углерода.

Заготовка исходного вещества закончена. Можно приступить к «сшиванию» полученных мономерных молекул в политетрафторэтилен, или фторопласт (тефлон). Процесс полимеризации проводят под высоким давлением в присутствии катализатора, например перекиси водорода.

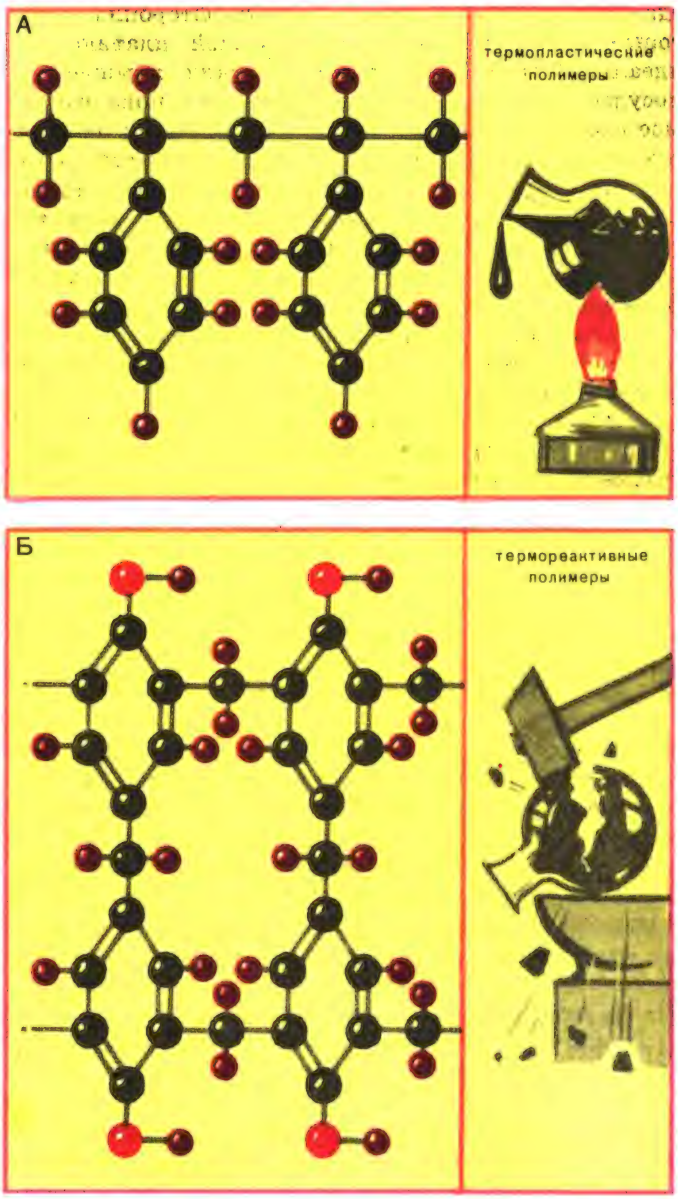
А — каучуки; *Б* — метод прививки полимеров; *В* — кремнийорганические полимеры: *1* — двуокись кремния (кварцевый песок); *2* — силоксан.



особенно интересны тем, что позволяют поднять «потолок» устойчивости к высоким температурам. Например, замещая в молекуле полиэтилена водородные атомы атомами фтора, получаем пластическую массу политетрафторэтилен, или фторопласт (тефлон):



Будет ли полимерное вещество обладать способностью повторно размягчаться и формоваться в новые изделия или же необратимо твердеть, зависит от взаимного расположения полимерных цепочек. При линейно-разветвленном расположении мономеров получаются так называемые термопластические полимеры (*А*); при поперечных связях с соседними цепочками — термореактивные (*Б*).



Эта белая твердая масса обладает необыкновенными свойствами и сохраняет их в очень широких температурных пределах от —60 до 300° С.

На фторопласт не действуют ни щелочи, ни кислоты. Его не растворяет даже так называемая царская водка (смесь соляной и азотной кислот), разъедающая золото и платину. Поэтому фторопласт, который иногда называют органической платиной,— идеальный материал для изготовления химической посуды, труб и аппаратуры. Кроме того, пока это самое скользкое вещество в мире. Брошенная на стол пленка из фторопласта может буквально «стечь» на пол. Если скользящую поверхность лыж подбить такой пленкой, скорость спуска с горы резко увеличится. Фторопластовые подшипники в некоторых приборах и машинах могут работать бесконечно долго без всякой смазки!

Фторопласт — прекрасный диэлектрик, обладающий к тому же исключительно высокой теплостойкостью. Защищенные им электрические провода и обмотки могут выдерживать температуру до 400° С (температура, при которой плавится свинец). Единственный недостаток полимера — трудность и сложность переработки его в изделия.

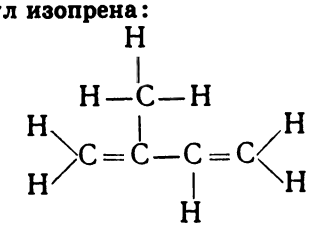
У истоков века полимеров

Изменяя состав исходных мономеров, порядок их чередования в гигантских молекулах, условия синтеза и последующей обработки полученных материалов, можно практически неограниченно изменять свойства полимера, получая самые разнообразные вещества: от легко воспламеняющихся до совершенно негорючих и жаростойких; от растворимых в воде до отталкивающих влагу; от хрупких и тяжелых, как металл, до эластичных и гибких, как каучук, или в десятки раз более легких, чем вода.

В этой сложной области органической химии ученым предстоит разрешить еще очень и очень много загадок.

Сейчас в распоряжении химиков-технологов более 40 видов исходных органических мономеров. Может показаться, что это не так уж много. Но из этих «кирпичиков» можно получать уже бесконечное количество синтетических веществ — волокон, пластических масс. Каждый день приносит нам все новые и новые открытия, новые материалы.

Вот, например, каучук. Известен лишь один вид природного каучука — изопреновый. Цепочка полимера природного каучука образована из нескольких тысяч молекул изопрена:



Как образуются углеводородные цепи природного каучука, ученые пока еще не знают, но химики создали каучук со структурой, близкой к природному.

У резины, изготовленной из натурального каучука, целый ряд недостатков. Она разбухает в бензине, боится масла, разрушается при нагревании свыше 120° С. Синтетические каучуки, например бутадиеновый каучук марки СКД, устойчивы к действию бензина и масла, глубокого холода и температур выше 100° С. Уретановый каучук химически совершенно непохож на натуральный. Он настолько износоустойчив, что изготовленные из него шины, по-видимому, смогут пережить автомобиль.

Из стеклянного волокна или ткани, пропитанных эпоксидными смолами, прессуют корпуса автомобилей, лодок, кораблей, детали изделий и шахтного оборудования и даже... спиральные пружины, которые по своей прочности, выносливости и упругости превосходят стальные.

Существуют полимерные клеи, способные склеивать все что угодно, например резец с державкой. При перегрузке чаще ломается резец или державка, чем место склейки. Площадь склейки, равная всего 20 см^2, способна уже через полчаса выдержать силу тяжести легкового автомобиля с тремя пассажирами. Подобные клеи применяются для «шитья» одежды, склейки корпуса и крыльев самолета и даже для склеивания тканей и кровеносных сосудов при хирургических операциях.

Из смеси некоторых полимерных клеев, изготовленных на базе фурфурола и песка, получается отличный легкий, быстротвердеющий, влагостойкий бетон, прочный и на сжатие и на растяжение, не нуждающийся в армировании сталью. Он не боится огня, кислот, щелочей, морской воды, времени, не нуждается в окраске.

Таковы лишь немногие области применения новых видов полимеров. Но и их достаточно, чтобы представить себе увлекательные перспективы, открывающиеся здесь перед наукой и техникой ближайшего будущего. Достижения сегодняшней химии полимеров — лишь первые ее шаги. Именно в этой области человек сможет развернуть свои силы и возможности для создания веществ, каких еще не было и нет.

Полимеры будущего

Химия полимеров — новая область науки. Она быстро развивается и создаст еще многие неизвестные сейчас материалы. Некоторые из них будут совершенно неожиданными, появление других можно предсказать уже сейчас. Полимеры будущего должны обладать многими замечательными качествами, но особенно важны полимеры с высокими механическими свойствами.

Полимеры — конструкционные материалы

Авторы научно-фантастических романов рисуют нам конструкционные материалы будущего, в которых сочетаются лучшие свойства известных материалов — прочность стали, прозрачность стекла и в то же время упругость и стойкость к ударам, присущие лучшим пластикам. Можно ли создать такие материалы? Из трех перечисленных материалов наиболее прочны силикаты (стекло), но они хрупки; металлы тяжелы и непрозрачны; пластики упруги, но недостаточно прочны. Уже давно предпринимаются попытки *сочетать* в одном материале лучшие свойства двух веществ — стекла и пластика. Для этого стекло вытягивают в тонкие нити, из нитей готовят ткани или подобие войлока и пропитывают жидким веществом, которое со временем или при нагревании превращается в упругий полимер. Таким образом, прочность создается стеклянными нитями, а упругость — пропитывающим полимером. Эти замечательные материалы — *стеклопластики* — широко применяются в машиностроении, для изготовления труб, мебели. В будущем, когда повысят прочность стеклянных нитей, увеличится и прочность стеклопластиков.

Но еще более интересный путь — замена стеклянных нитей нитями из синтетических полимеров. Уже сейчас можно получать полимерные нити с прочностью хорошей стали. Плотность таких нитей в 7—8 раз меньше, чем плотность стали. В недалеком будущем удастся получить еще более прочные искусственные волокна. Применяя стеклянные и органические волокна, химики создадут новые материалы легче и прочнее стали.

Исключительно прочные волокна получаются при осторожном обугливании прочных органических волокон и нагревании до перехода их в кристаллические графитовые волокна. Прочность их достигает 2—3 ГПа и, возможно, будет повышена до 5 ГПа при относительной плотности меньше 2. Очень важно, что такие волокна совершенно не растягиваются при натяжении, а при очень больших усилиях лопаются, как стальная струна.

Группа материалов, состоящих из различных волокон и полимера-связующего, называется *армированными пластиками*. Пока они с трудом перерабатываются в изделия, но, когда освоят их обработку на машинах, армированные пластики станут важнейшим конструкционным материалом.

Уже сейчас есть полимерные материалы, которые отличаются необычайно высоким сопротивлением к истиранию и износу. Шины, сделанные из них, проходят сотни тысяч километров. Удивительная способность этих полимеров сопротивляться износу вызвана тем, что в них не распространяются трещины: каждая маленькая трещина, являющаяся началом разрушения вещества, быстро залечивается. В любом месте повреждения эти полимеры быстро упрочняются. Основой для этих полимерных материалов служат пока еще дорогие и редкие *полиуретанэфиры*. Но когда разработают более простую технологию, неизнашивающиеся полимеры прочно войдут в жизнь.

С помощью таких полимеров химики получат еще один класс материалов — прочные и очень легкие *полимерные пены*. Обычные полимерные пены применяются довольно широко и сейчас; они обладают легкостью и малой теплопроводностью. Но они непрочны и легко истираются. Если же пены приготовить из неистираемого полимерного вещества, то применять их можно будет значительно шире. Уже сейчас пены из полиуретанэфиров начинают широко использовать в технике, для сооружения легких домов, а также в быту (мебель, матрацы, легкая и теплая подкладка для одежды).

Однако прочность полимерных пен остается все же невелика. Мы уже знаем, что для упрочнения полимеров в них вводят волокна. Нельзя ли армировать и пены? Жесткими волокнами (стеклянными или даже обычными синтетическими) армировать пены нельзя: слишком велико различие их свойств. Пена будет легко растягиваться, а жесткие волокна растягиваться так не смогут и начнут от нее отрываться. Материал легко разрушится. Поэтому пену армируют упругими и прочными волокнами, которые растягиваются так же, как и она сама. Таким способом можно создать прочные, очень легкие и стойкие к износу пенные полимерные материалы.

Что же это за материал, который защищает котенка так надежно, что он не обращает внимания на огонь? Этот материал — кремнийорганический полимер, силикон — тонкий, прозрачный, термостойкий, не проводящий тепло (пламя горелки около 1000° С).

Полимеры в жизни людей

В будущем появится много новых полимерных материалов — легких, прочных, эластичных. Как же будут выглядеть одежда, обувь, жилища, предметы обихода, транспорт?

Мы привыкли одеваться в ткани и обычно уже не думаем, насколько сложно их изготовление. Сначала получают волокна, из волокон делают нити (пряжу), из нитей — ткань. Каждый процесс состоит из десятков отдельных операций, через многие машины проходит каждое волоконце (см. т. 5 ДЭ, ст. «От волокна до ткани»).

Конечно, в будущем люди научатся получать материалы для одежды более простыми путями, и некоторые из этих путей уже наметились. Прежде всего, можно использовать тонкие слои полимерных пен. Они исключительно легки и хороши для теплой одежды. Сейчас пены еще недостаточно прочны и из них делают подкладку для утепления одежды. Когда же повысят их прочность, они станут материалом для одежды.

Любой материал для одежды должен пропускать воздух и пары влаги, быть пористым. Поэтому обычные сплошные пленки, вероятно, никогда не будут служить материалом для одежды, за исключением плащей и специальных защитных костюмов для работы с вредными веществами. Чтобы пленка «дышала», она должна содержать большое количество очень маленьких дырочек.

Нетканые материалы для одежды будут получать и уже получают из беспорядочно перепутанных волокон, создавая нечто среднее между войлоком, фетром и бумагой. Чтобы эти ткани были тонкими и одновременно достаточно прочными, их делают из очень прочных волокон. Кроме того, чтобы ткань не мялась, как бумага, волоконца должны быть упруги и склеены друг с другом. Склеивающее вещество не должно образовывать сплошную пленку, иначе потеряется пористость, способность пропускать воздух и влагу. Значит, склейка будет точечной только в тех местах, где волоконца соприкасаются друг с другом. Это очень нелегкая задача, но она разрешима. Привычные нам ткани постепенно исчезнут и будут заменены различными неткаными изделиями.

Изменятся не только сами материалы для одежды. Изменятся и волокна, из которых делают ткани. Появятся очень прочные волокна. На первый взгляд может показаться, что прочность не так уж нужна одежде — ведь никто не будет носить одну и ту же вещь десятки лет. Она надоест, выйдет из моды, устареет прежде, чем износится. Но очень прочные волокна нужны и для нетканых изделий, и для смешения с другими волокнами, которые менее прочны, но обладают другими ценными свойствами. Наиболее интересна комбинация из очень прочных и пористых волокон. Пористые волокна можно получить из полимерных пен. Они исключительно легки и хороши для теплой одежды, но не прочны и не могут применяться в чистом виде. В смеси же получатся замечательные легкие и теплые материалы, у которых большое будущее.

Синтетические волокна так быстро совершенствуются, что возникает вопрос: сохранятся ли в будущем натуральные волокна, какие, в каком количестве и в каком виде? Уже сейчас известны химические волокна, свойства которых лучше натуральных, и, главное, они дешевле, чем природные. В первую очередь невыгодным станет производство натурального шелка. Чтобы его получить, затрачивается громадный труд — в десятки раз больший, чем на про-

Кувалда, вес которой около 4 кг, не может разбить пластину из органического полимерного материала. Толщина пластины всего 6 мм, но ее не может пробить даже пуля с расстояния 3 м.

изводство искусственных волокон. Такая же судьба ожидает и лен. Искусственные волокна из целлюлозы уже сейчас очень близки к хорошему льняному волокну, а в будущем превзойдут его. Лен как культуру сохранят не из-за волокна, а из-за льняного масла, получаемого из его семян. Это масло перерабатывают в высококачественную олифу для красок. Пока будут выращивать лен, сохранится, конечно, и льняное волокно. Когда же найдут синтетические вещества для лакокрасочных покрытий, льняное волокно исчезнет окончательно.

Возможно, что шерсть сохранит свое значение несколько дольше. У шерстяного волокна есть замечательное свойство — мелкая извитость, которая придает изделиям из него высокие теплоизолирующие свойства. Совсем недавно удалось выяснить причину такой извитости. Оказалось, что каждое волокно шерсти состоит из множества более мелких волоконец двух разных типов, склеенных друг с другом. Одни из них имеют круглое сечение, другие почти плоское. Неравномерное распределение этих волоконец по сечению волокна и создает мелкую извитость. Когда узнали причину извитости, появилась возможность создать синтетические волокна такого же строения, а следовательно, с такими же свойствами. Но шерсть отличается еще и строением поверхности волокон, покрытых мельчайшими чешуйками, подобно змеиной коже. Именно эта особенность строения поверхности волокон шерсти обусловливает их способность сцепляться друг с другом, благодаря чему шерстяные изделия хорошо сопротивляются истиранию. Вероятно, в будущем создадут синтетические волокна с такими свойствами.

Сохранится надолго и хлопок. Но применять будут только химически обработанные волокна. Уже сейчас поверхность хлопковых волокон покрывают очень тонким слоем синтетических полимеров. И хотя количество нанесенного вещества ничтожно (несколько процентов от массы хлопка), хлопковые волокна после такой обработки приобретают ряд ценных свойств, присущих обычно синтетическим волокнам: хорошо окрашиваются, не мнутся и сохраняют свою форму после стирки. Несомненно, в будущем удастся повысить их прочность и стойкость к износу, а может быть, создать и извитость, как у шерсти.

На века сохранится и древесина — великолепный материал нашего времени. Но и его будут применять только в модифицированном виде. Древесину станут пропитывать мономерами — легкоподвижными жидкостями, проникающими в мельчайшие поры древесины и затем превращающимися в полимеры. Прекрасные природные качества дерева будут превосходно сочетаться с качествами пластиков. Древесина станет негниющей, не будет набухать в воде и трескаться при высушивании, станет прочнее и красивее.

Вероятно, гораздо шире, чем сейчас, будут использовать синтетический клей. Склеивание — это самый удобный способ соединять части любой конструкции, будь то мебель, машина или одежда. Но дело не только в прочности клея или в его способности соединяться с материалами. Важно, что в тонком слое клея, отличающемся по своим механическим свойствам от склеиваемых материалов, как бы концентрируются те напряжения, которые испытывает склеенное изделие. Поэтому часто слои клея разрушаются в первую очередь. В будущем удастся найти такие приемы склеивания, когда один материал постепенно будет переходить в другой. Для этого применят либо склеивающие промежуточные пленки, либо клей, проникающий глубоко в материал.

Бумага станет более прочной. Для приготовления бумаги из древесины будут извлекать целлюлозу, почти ее не разрушая, во всяком случае разрушая гораздо меньше, чем сейчас. Чтобы получить очень прочную, эластичную, немнущуюся бумагу, в бумажную массу добавят синтетические волокна, а потом проклеят бумагу синтетическими полимерами. Такая бумага станет похожа на тонкую ткань. Так, вероятно, наступит переход от бумаги к текстильным материалам, особенно нетканым, о которых уже говорилось. Конечно, в будущем бумагу станут использовать и для одежды, легкой, красивой, необычно дешевой. Такую одежду будут надевать один или несколько раз.

Изменится и вид жилищ. Полы уже сейчас покрывают эластичным материалом из полихлорвинила.

В будущем стены и потолки будут делать из слоистых пластиков — слоев бумаги или ткани, пропитанных полимерным связующим. Такие материалы не только красивы — к ним не пристает пыль, они легко моются. Широко будут применяться и армированные пластики, особенно для легких зданий. Для легких построек будут использоваться тонкие и толстые пленки и пены. Сейчас такие дома-палатки из пленки, натянутой на каркас, недолговечны. Их разрушает влага, ветер, солнце. Но со временем создадут долговечные полимерные пленки. А пены из полимеров уже сейчас — прекрасный строительный материал. Множество легких жилищ и в теплых краях, и на далеком севере будут делать из пленок и пен.

Полимеры в медицине и биологии

Уже сейчас известны полимеры, в первую очередь *полиакрилаты* и *полиэфиры*, которые способны как бы срастаться с тканями живых организмов. В будущем появится еще больше таких полимеров. Станет возможным заменять поврежденные сухожилия, части кровеносных сосудов эластичными и прочными полимерными пленками или тканями.

Не менее интересна возможность склеивать полимерными клеями сломанные кости. Пострадавший сможет пользоваться поврежденным органом вскоре после перелома, а клей со временем рассосется и заменится соединительной костной тканью. Наверное, широко будут применять искусственную кровь, которая сможет выполнять все основные функции крови и, главное, переносить кислород от легких ко всем тканям организма.

Уже используют аппараты, выполняющие функции почки. Для этого кровь очищают от накапливающихся в организме вредных примесей, пропуская ее через различные конструкции, в которых струи крови и воды разделены полимерной пленкой. Такие пленки пропускают примеси, но задерживают все необходимые организму вещества крови. Если взять пленки, проницаемые для кислорода и углекислоты, и пропускать по одну сторону их кровь, а по другую — воздух, можно имитировать действие легких.

Со временем люди научатся получать полимерные вещества, вырабатываемые только в организмах, в первую очередь ферменты, хотя бы простейшие. Такие синтетические полимерные вещества явятся важной группой лекарств. Они смогут влиять на разнообразные процессы жизнедеятельности так, как на них влияют ферменты, гормоны и другие биологически активные соединения. Научившись синтезировать подобные очень сложные по своему строению полимерные вещества, химики попытаются осуществить процессы, протекающие пока лишь в живых организмах. Наиболее важный из них — это фиксация азота, т. е. поглощение азота из воздуха и превращение его в различные химические соединения.

Второй пример таких процессов — поглощение растениями углекислоты и превращение ее в первую очередь в углеводы. В растениях этот процесс происходит под действием света в обычных условиях, но он, конечно, будет осуществлен при помощи синтетических полимеров-биокатализаторов.

Все шире в химии будут распространяться полимерные реагенты. Уже сейчас существует громадное количество полимерных соединений, среди которых представлены почти все классы органических веществ. Есть полимерные кислоты и основания, полимерные спирты, альдегиды и кетоны, разнообразные ароматические и гетероциклические полимерные соединения. Они могут реагировать с другими веществами подобно тому, как происходят химические реакции в среде обычных низкомолекулярных веществ. Но здесь одним из продуктов происходящих реакций будет полимерное вещество. А полимерное вещество легко отделить от реакционной среды. Это создает новые химические возможности. Такие полимерные реагенты — кислоты и основания — называют *ионообменными смолами*. Они уже сейчас применяются достаточно широко, в первую очередь для очистки воды.

Но полимерные электролиты или ионообменные смолы могут и будут служить и другой важной цели. Если приготовить из них сплошные или пористые пленки и пропустить через них соленую воду под действием давления или электрического поля, то можно создать условия, когда они не будут пропускать соли. Таким образом, решится проблема опреснения воды. В будущем появятся полимерные реагенты — окислители и восстановители. Такое название дано этой группе веществ потому, что окисление или восстановление всегда связано с переносом электронов. Чтобы окислить или восстановить какое-либо соединение, достаточно будет пропустить его через слой зерен или волокон полимерного окислительно-восстановительного реагента. Иногда такие полимеры называют электронообменниками.

Еще шире будет применяться другая группа этих реагентов — *комплексонные смолы*. Они способны образовывать комплексы с определенными металла-

ми. Такие комплексонные полимерные реактивы в виде пленок или волокнистых материалов смогут извлекать нужные металлы из растворов очень малых концентраций, даже из морской воды. Когда земные богатые месторождения будут выработаны, придется извлекать металлы из более бедных месторождений. И новые полимерные реагенты помогут найти иные способы добычи цветных и редких металлов.

Возникнет еще много новых типов полимеров. Светочувствительные полимеры, которые дают сразу рельефное изображение, могут применяться в фотографических и полиграфических процессах. Полимерные проводники и полупроводники, особенно плавкие и растворимые,— очень удобный тип электротехнических материалов. Полимерные электролиты станут неотъемлемыми частями химических источников тока — аккумуляторов, элементов и особенно топливных элементов, способных превращать химическую энергию топлива в электрическую (см. ст. «Большая задача электрохимии»). Ученые найдут стойкие и активные полимерные поверхностноактивные вещества, которые будут создавать и разрушать суспензии и эмульсии, регулировать испарение воды с поверхности водоемов. Возникнут полимерные вещества, способные обеспечивать идеальное скольжение или громадное сцепление поверхностей, т. е. *фрикционные полимерные материалы*. Появится множество полимеров, которые сейчас трудно предугадать, и полимеры станут так же необходимы людям, как ранее необходимы были камень и металлы.

Химия жизни

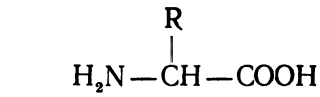
Ученых уже давно волнует вопрос об общих основах процессов жизни. Однако лишь совсем недавно, в 60-е годы нашего века, успехи биологии, химии и физики позволили вплотную подойти к этой проблеме. Эта сложнейшая проблема только начала разрабатываться, многое из того, что мы узнали,— лишь повод задать новые вопросы. Для полного понимания физико-химических процессов жизни необходимы обширные познания в биологии, химии, физике и других областях знаний.

Из каких элементов состоят организмы

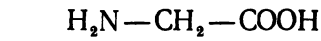
В самом общем виде ответ на этот вопрос известен уже довольно давно: только из тех элементов, которые содержатся в неорганических веществах. Между живой и неживой природой принципиальных различий по элементарному составу нет. При этом основная масса тела строится лишь из небольшого числа элементов. Так, в состав человеческого тела входит кислород (примерно 65%), углерод (18%), водород (10%), азот (3%), кальций (2%), фосфор (1%), калий (0,37%), сера (0,25%), натрий (0,14%) и хлор (0,14%). Это так называемые органогенные элементы, они составляют 99,9% всякого живого организма. В минимальных количествах входят магний, железо, иод, марганец, кобальт, медь и др.

Как построены белки

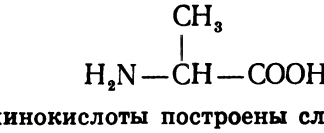
Из каких главных типов соединений состоят живые организмы? Ученые установили, что между самыми, казалось бы, различными организмами — грибами и бактериями, растениями и рыбами, птицами и млекопитающими — нет принципиальных различий. Все они состоят из нескольких типов веществ, общих для всех организмов. Основу живого составляют высокомолекулярные соединения — *белки*. Все белки — микробов, растений, животных, человека — состоят в основном из 20 аминокислот. Вот общая формула их строения:



Аминокислоты различаются лишь строением группы R. Если в самом простом случае радикал R — водород, то получится простейшая аминокислота *глицин*:



Если радикал R — CH_3, получается *аланин* (рис. 1):



Другие аминокислоты построены сложнее, например в аминокислоте *фенилаланине* один водород в ме-

Рис. 1. Все аминокислоты (кроме глицина) встречаются в двух формах: *L* и *D*. На рисунке изображена аминокислота аланин: *L*-форма *(слева)*, которая входит в состав белков, и ее оптический антипод — *D*-форма *(справа)*.

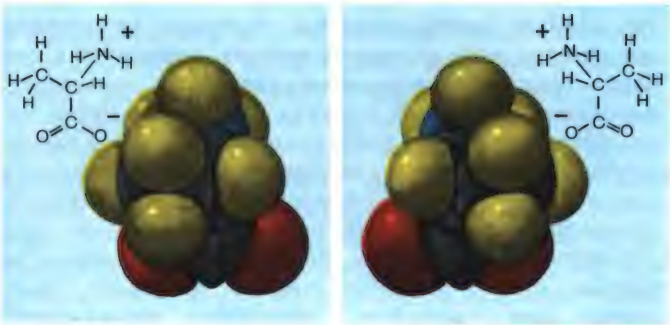


Рис. 2. Схематическое изображение α-спирали полипептидной цепи. α-спираль стабилизируется водородными связями (пунктирные линии) между группами C—O и N—H аминокислот, находящихся в цепи на расстоянии четырех остатков друг от друга.

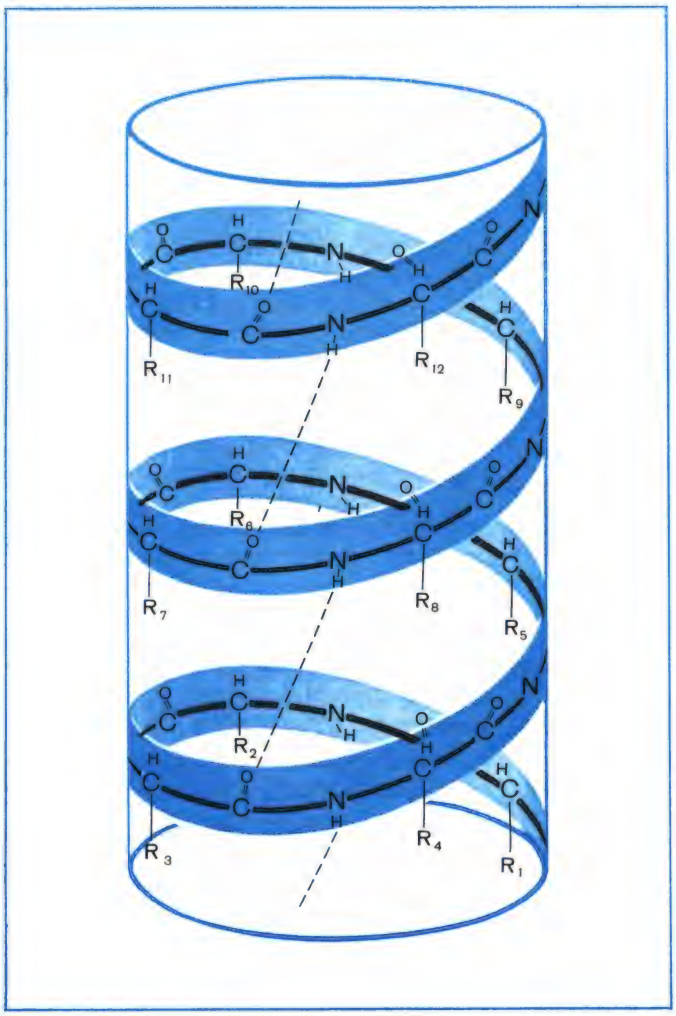
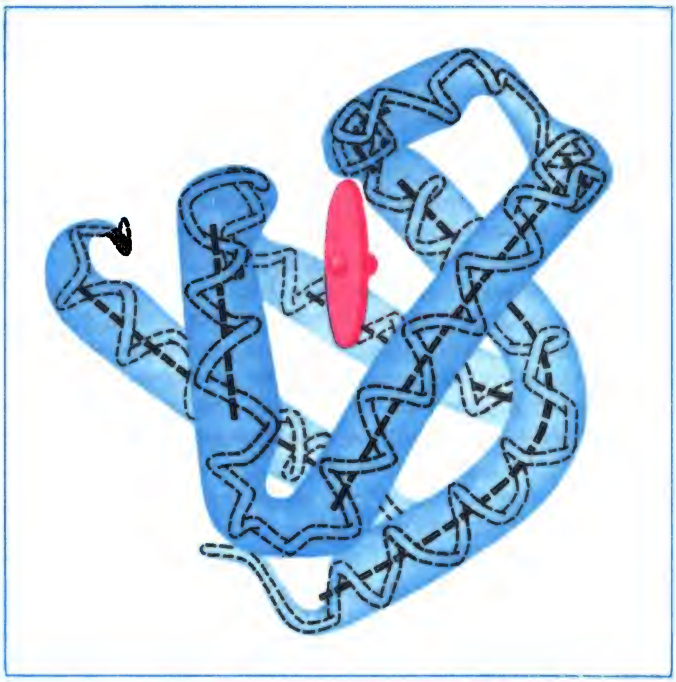
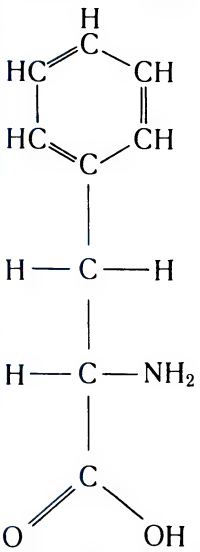


Рис. 3. Третичная структура мышечного белка миоглобина. Красный диск (на рисунке) соответствует положению гема — железосодержащего участка белка.

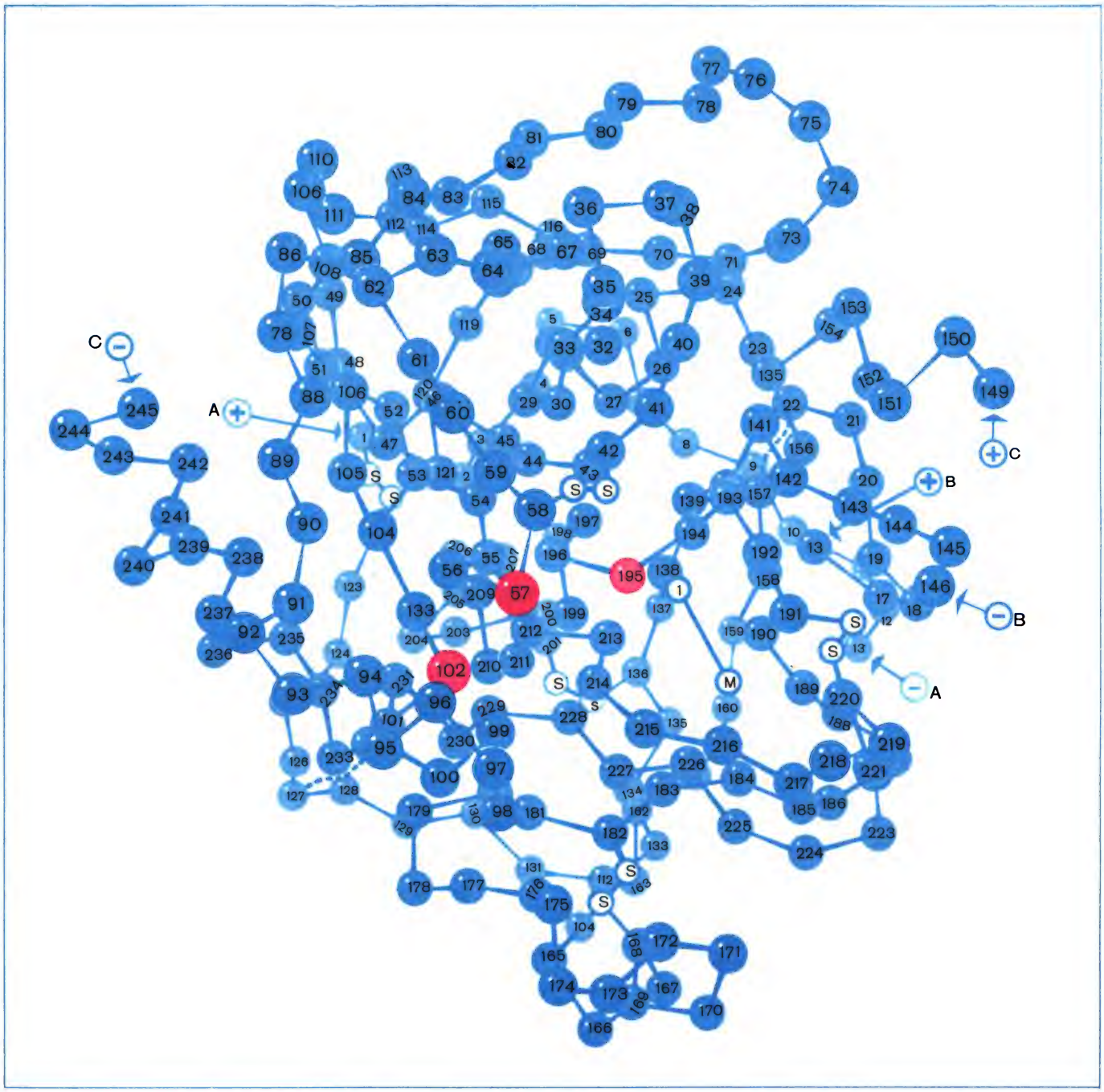


тильной группе аланина заменен на ароматический остаток — фенил:



Во всех 20 аминокислотах есть общая часть, содержащая две реакционноспособные группы: аминогруппу NH_2 и карбоксильную группу COOH. Эти группы очень легко вступают в реакцию. Путем отщепления одной молекулы воды от двух аминокислот получается более сложное соединение с характерной группировкой атомов: —CO—NH— (называемой *амидной* или *пептидной*):

Рис. 4. Схема пространственного строения протеолитического фермента химотрипсина. На рисунке видно, насколько пространственно сближены аминокислотные остатки, находящиеся в первичной структуре на далеком расстоянии (номера в кружочках обозначают последовательность аминокислот в полипептидной цепи).



$$H_2N-\underset{R_1}{\underset{|}{CH}}-COOH + H_2N-\underset{R_2}{\underset{|}{CH}}-COOH = H_2N-\underset{R_1}{\underset{|}{CH}}-CO-NH-\underset{R_2}{\underset{|}{CH}}-COOH + H_2O$$

В полученном соединении (дипептиде) опять-таки есть свободная аминогруппа и свободный карбоксил. При взаимодействии дипептида с аминокислотами и другими пептидами могут образоваться *полипептиды* — полимеры. Их характерная особенность в том, что они построены из остатков аминокислот и со-

держат амидные (пептидные) связи. Сейчас известно очень много пептидов, как найденных в природе, так и синтезированных. В их составе многие десятки аминокислот. Например, важный гормон, регулирующий деятельность надпочечников,— это пептид, содержащий 39 остатков аминокислот.

По такому же принципу построены белки — это уже полипептиды сложного строения и большого молекулярного веса. В отличие от обычных полимеров, с определенной последовательностью мономеров в цепи (см. ст. «Полимеры»), все белки отличаются друг от друга последовательностью остатков различных аминокислот вдоль цепи. Последовательность, в которой соединяются между собой различные аминокислоты, называют *первичной структурой белка* (полипептида). Ее выяснением занимаются сейчас многие лаборатории мира. Работа эта сложная и очень важная.

К 1971 г. удалось полностью установить первичную структуру около 200 белков, в том числе очень сложных, содержащих по нескольку сотен остатков аминокислот.

Пространственная структура белков

Однако установить первичную структуру белка еще недостаточно, чтобы полностью понять его свойства, ведь белок не простая линейная молекула. Входящие в состав белка остатки аминокислот взаимодействуют между собой, образуя определенные пространственные структуры; наиболее характерная из них — спиральная. Образование водородных связей и определенные пространственные ограничения приводят к тому, что длинная полипептидная цепь легко свертывается в спираль; на каждый ее виток приходится $3^2/_3$ аминокислотного остатка (т. е. 11 аминокислот располагаются в виде примерно трех витков α-спирали). Таким образом, длинные цепи белков имеют вид толстых спиралей (рис. 2).

Выяснением *вторичной структуры белка*, т. е. той формы, которую приобретает белковая нить, построенная из аминокислот, изучение формы белковой молекулы не заканчивается. Оказывается, возникшие спирали (помимо спиральной существуют и другие формы вторичной структуры) далее взаимодействуют между собой, образуя очень сложный, но строго определенный по форме клубок. Размещение спиралей в таком клубке называют *третичной структурой белка* (рис. 3). Иногда сложившиеся определенным образом громадные молекулы белка могут взаимодействовать между собой, как бы слипаясь. Такое слипание (ассоциацию) белков называют *четвертичной структурой*.

Небольшие изменения во вторичной, третичной и четвертичной структурах меняют характер биологического действия.

Очень сложная форма белков, особенно белковых катализаторов — ферментов, возникает при образовании третичной и четвертичной структур. Это приводит к тому, что некоторые аминокислотные остатки, находящиеся далеко друг от друга в полипептидной цепи, фактически сближаются; они могут образовать определенную структуру — активный центр, который обеспечивает высокую реакционную способность фермента. Так, например, в молекуле протеолитического (т. е. расщепляющего белки) фермента химотрипсина, который активно участвует в пищеварении, пространственно сближенными оказываются аминокислоты, находящиеся в цепи на 57, 102 и 195-м местах. При этом боковые цепи аминокислот приобретают способность осуществлять реакции, которые не способны проводить в отдельности, т. е. проявляют кооперативное действие. Функции отдельных групп разграничены: одни закрепляют расщепляемое вещество в определенном месте (тогда его концентрация резко возрастает и реакции могут протекать быстрее), другие группы как бы растягивают в расщепляемом веществе те связи, которые разрываются третьими группами, и т. д. (рис. 4).

Особенности строения ферментов, выработавшиеся за время длительного эволюционного развития, делают их исключительно сильными и специфическими катализаторами. Например, одна молекула фермента каталазы обеспечивает распад в течение одной минуты около 5 млн. молекул перекиси водорода (при нормальной температуре тела). Каталаза в миллионы раз эффективнее, например, такого катализатора, как ионы трехвалентного железа. Ферментные системы азотфиксирующих бактерий позволяют связывать молекулярный азот воздуха при комнатной температуре и нормальном давлении, а в технике этот процесс проводят, применяя различные катализаторы, при давлении в десятки мегапаскалей и температуре выше 500° С.

Удивительно высока специфичность ферментов, их «умение выбирать» определенные молекулы из ряда очень похожих. Фермент глюкозоксидаза окисляет лишь один определенный изомер глюкозы, не затрагивая не только других сахаров, но и других пространственных изомеров глюкозы. Дальше, при описании механизма биосинтеза белка, будет рассказано об одном из этапов этого сложного процес-

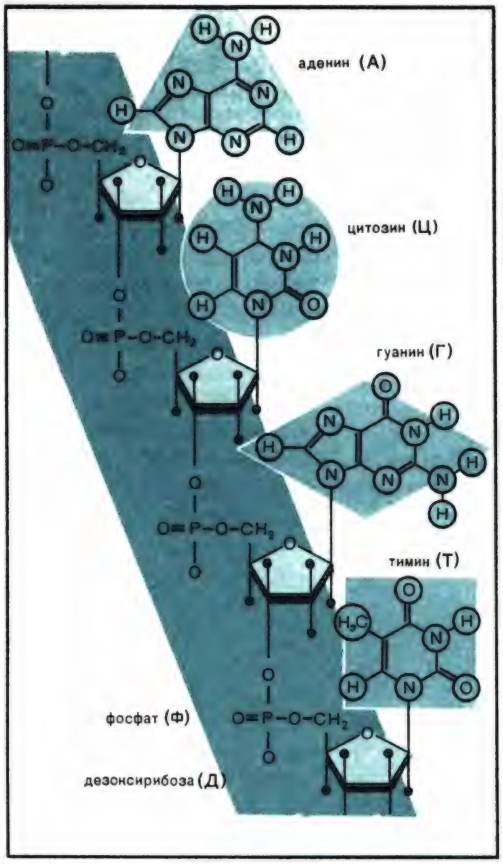


Рис. 5 Формула части цепи дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Отдельные звенья цепи (мононуклеотиды) связаны воедино остатками фосфорной кислоты.

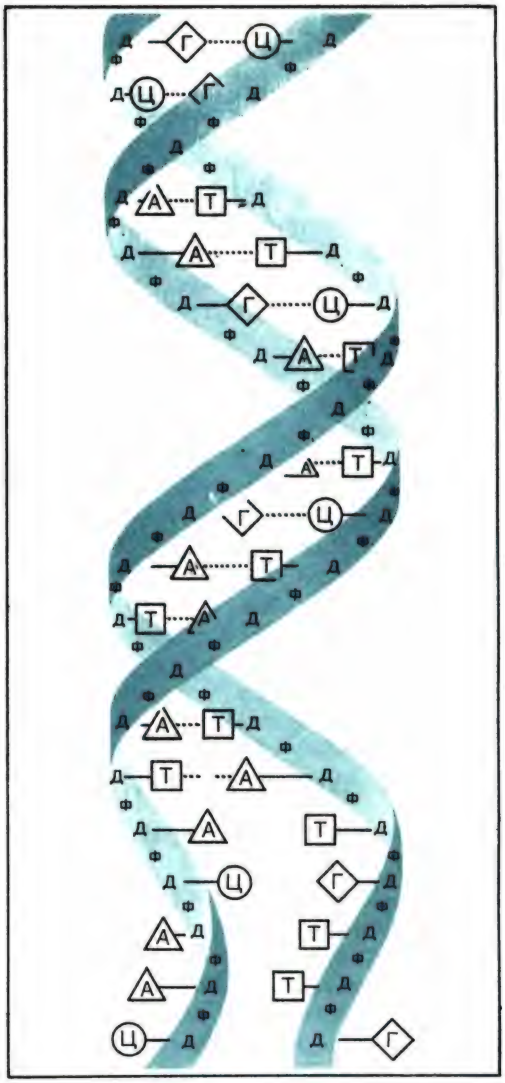
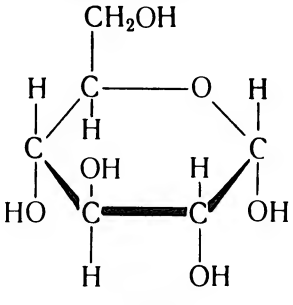


Рис. 6. Схематическое изображение двойной спирали ДНК. Азотистые основания А, Г, Т и Ц находятся внутри спирали. Они попарно соединены водородными связями. Фосфатные группы (Ф) и остатки дезоксирибозы (Д) расположены снаружи спирали.

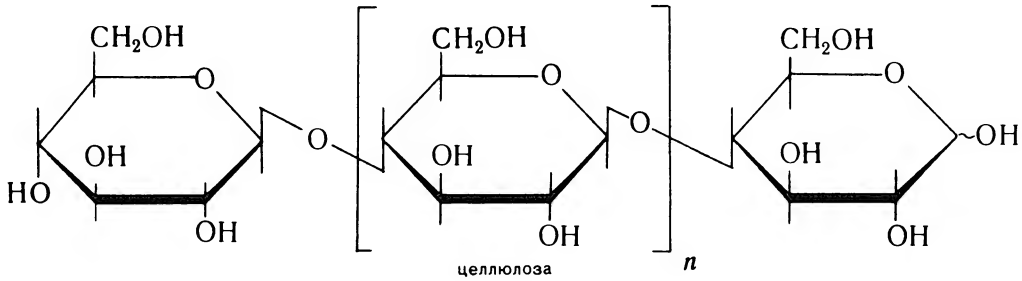
са — присоединении аминокислот к соответствующим макромолекулам (транспортным рибонуклеиновым кислотам). Осуществляющие эту реакцию особые ферменты безошибочно выбирают из 20 аминокислот и из 20 очень сходно построенных макромолекул только нужные пары и соединяют их.

Что такое полисахариды

Белки очень важный, но далеко не единственный вид биополимеров. Биополимерами являются полисахариды, составляющие основную массу растительного материала. Полисахариды, подобно белкам, построены из простых мономеров — только роль мономеров здесь играют не аминокислоты, а сахара (в первую очередь глюкоза). Две молекулы сахара путем отщепления молекулы воды соединяются, образуя дисахарид. Если соединятся между собой многие молекулы глюкозы, получится полисахарид, например целлюлоза, крахмал и гликоген. При этом может получиться длинная неразветвленная молекула (например, целлюлоза) или сильно разветвленная (например, крахмал или гликоген):



глюкоза



целлюлоза

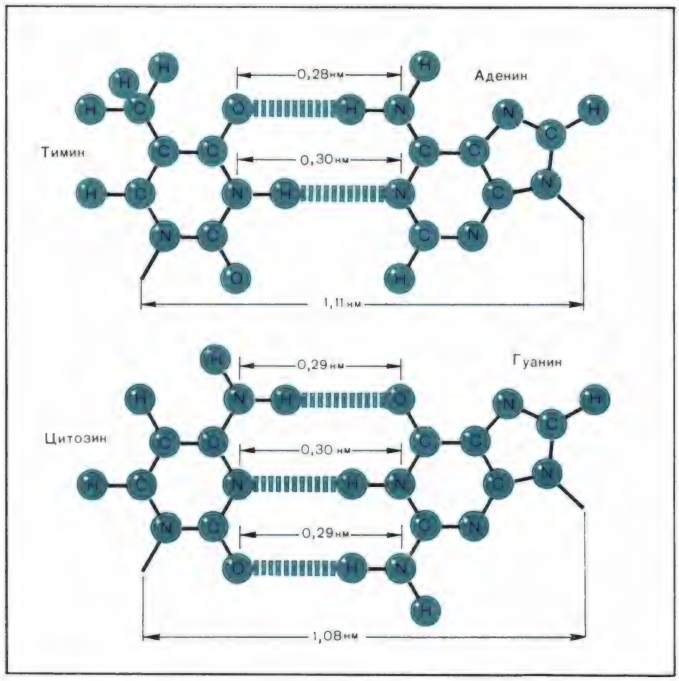
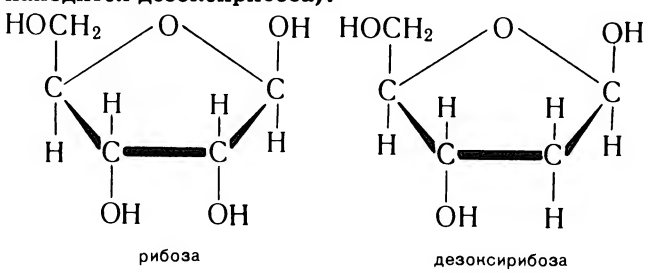


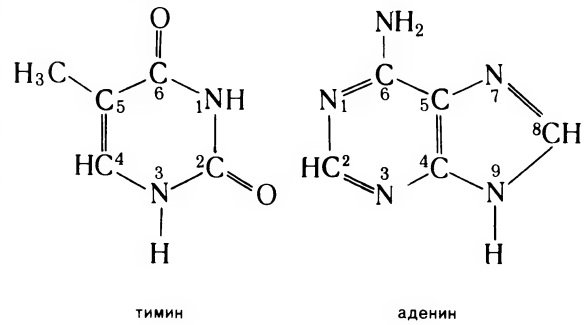
Рис. 7. Пары азотистых оснований способны давать устойчивые водородные связи при образовании двойной спирали ДНК. Аденин связан с тимином двумя водородными связями (прерывистая полоса), а гуанин с цитозином — тремя.

Сложное строение полинуклеотидов

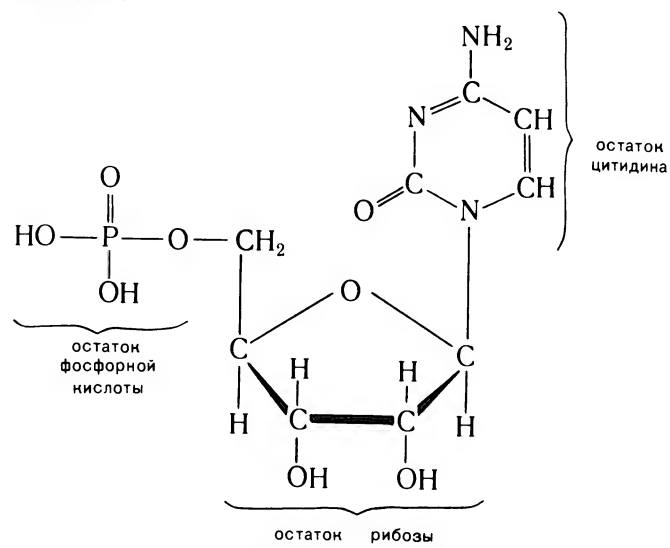
Не менее важными, чем белки, и не менее сложными биополимерами являются *нуклеиновые кислоты*. Их сложность во многом определяется тем, что входящие в их состав мономеры (мононуклеотиды) сами по себе значительно сложнее, чем аминокислоты или моносахариды. Каждый мононуклеотид состоит из трех частей — углевода, гетероциклического (содержащего атомы азота в кольце) основания и остатка фосфорной кислоты. Все нуклеиновые кислоты обычно делят по входящему в их состав моносахариду на две группы: *рибонуклеиновые кислоты* — РНК (в их состав входит сахар рибоза) и *дезоксирибонуклеиновые кислоты* — ДНК (в их составе находится дезоксирибоза):



Нуклеиновые кислоты двух типов, несмотря на небольшие изменения в строении, имеют значительные различия в свойствах и биологических функциях. Каждый тип нуклеиновой кислоты (РНК и ДНК) имеет набор из 4 гетероциклических азотсодержащих оснований: по два пиримидина (6-кето- и 6-аминопиримидины — «малые» основания) с одной циклической группировкой и по два пурина (6-кето- и 6-аминопурины — «большие» основания) со связанными между собой двумя циклическими группировками. У РНК в качестве 6-кетопиримидина находится урацил, у ДНК — его 5-метильное производное — тимин. Остальные основания у РНК и ДНК одинаковы: 6-аминопиримидином является цитозин, 6-кетопурином — гуанин и 6-аминопурином — аденин:



Третья составная часть мононуклеотида (т. е. мономера, входящего в состав нуклеиновой кислоты) — остаток фосфорной кислоты. Ниже приведена формула одного из рибонуклеотидов — цитидиловой кислоты:



Аналогично построены и другие рибонуклеотиды, содержащие вместо остатка цитидина урацил, аденин или гуанин. У дезоксирибонуклеотидов вместо рибозы находится дезоксирибоза. В длинной молекуле ДНК или РНК нуклеотиды соединены между собой за счет отнятия молекулы воды от гидро-

ксильной группы сахарного и фосфатного остатков (рис. 5).

Формулы мононуклеотидов очень громоздки; строение каждого отличается от соседнего мононуклеотида лишь характером входящих в их состав гетероциклических оснований. Поэтому условились обозначать каждый мононуклеотид в зависимости от содержащегося в нем основания одной буквой: А (нуклеотид содержит аденин), Г (гуанин), Т (тимин), Ц (цитозин). При таком обозначении приведенную выше сложную формулу фрагмента ДНК можно сокращенно написать так: — А — Ц — Г — Т.

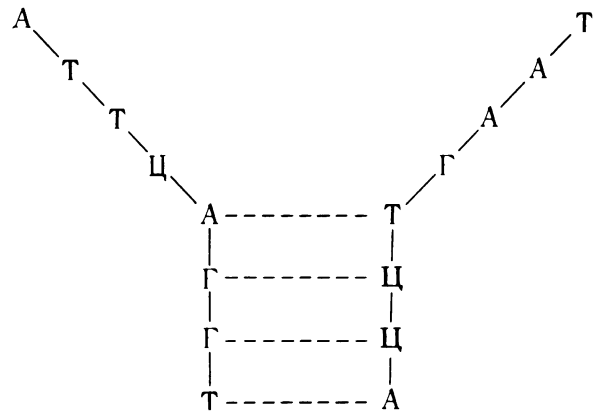
Нуклеиновая кислота — «нить жизни»

Молекулы нуклеиновых кислот очень велики, они содержат десятки, сотни и тысячи отдельных звеньев — *нуклеотидов*. Конечно, как и у белков, последовательность различных нуклеотидов в цепи (т. е. первичная структура нуклеиновой кислоты) еще не определяет всех ее свойств. Очень важна ее вторичная структура, т. е. форма, которую приобретает реальная молекула нуклеиновой кислоты. Особенно важную роль в науке сыграло выяснение вторичной структуры ДНК, создание ее правильной модели. В 1953 г. английские ученые Д. Уотсон и Ф. Крик выполнили это. Такая модель называется моделью Уотсона — Крика. Оказалось, что ДНК обычно находится в природе в форме двойной спирали: две нити ДНК обвивают друг друга подобно двум переплетенным проводам (рис. 6).

Чем же удерживаются эти две нити от раскручивания? Как и в случае α-спирали белков, основную роль здесь играют водородные связи, возникающие в данном случае между гетероциклическими основаниями. Для их образования необходимы два условия — в одной цепи должно быть «большое» основание (пурин), в другой — «малое» (пиримидин); в одной должно быть аминосоединение, в другой — кетосоединение. Вследствие этих условий реально могут существовать лишь две пары: А — Т и Г — Ц (рис. 7). Два «малых» основания (Т — Ц, Т — Т, Т — Ц и т. д.) не смогут удерживаться, так как между ними будет слишком большое расстояние и невозможна прочная водородная связь. Для двух «больших» оснований в спирали не хватит места. Два аминооснования (А и Ц) или два кетооснования (Т и Г) не могут создавать водородную связь. Поэтому в двойной спирали друг другу будут соответствовать лишь две пары: А — Т и Г — Ц. Таким образом, если в молекуле ДНК имеется участок АТТЦАГГТ, то в соответствующей (или, как обычно говорят, в комплементарной, т. е. дополняющей ее) цепи будет участок ТААГТЦЦА.

Эта особенность ДНК дает ответ на такой важный вопрос, как принципиальный механизм передачи наследственных признаков. Сейчас накоплен очень большой экспериментальный материал, убедительно доказывающий, что основной хранитель наследственной информации — молекулы ДНК. Важнейшим свойством вещества — хранителя информации — должна быть его способность к самовоспроизведению, т. е. возможность «изготавливать абсолютно точные копии». Строение ДНК как двойной спирали с комплементарными цепями автоматически обеспечивает это свойство.

Представим себе, что под влиянием каких-то факторов скрученная цепь начинает раскручиваться. Пусть она раскрутится сверху вначале на 4 звена:



На освободившихся концах начинается построение вторых цепей. Рядом с А может оказаться лишь Т, рядом с Т — А, рядом с Ц — Г и т. д.

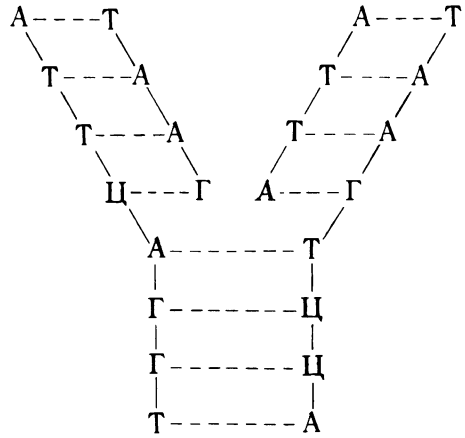


Рис. 8. Схема биосинтеза белка.

Когда две цепи исходной молекулы ДНК полностью раскрутятся и каждая из них дополнится вновь синтезированной цепью (обвивающейся вокруг половины старой двойной спирали), получатся вместо одной две совершенно одинаковые двойные спирали: у каждой из них одна нитка образовалась из «старой» молекулы, а другая была синтезирована вновь. Таким образом, получается точная копия исходной молекулы ДНК.

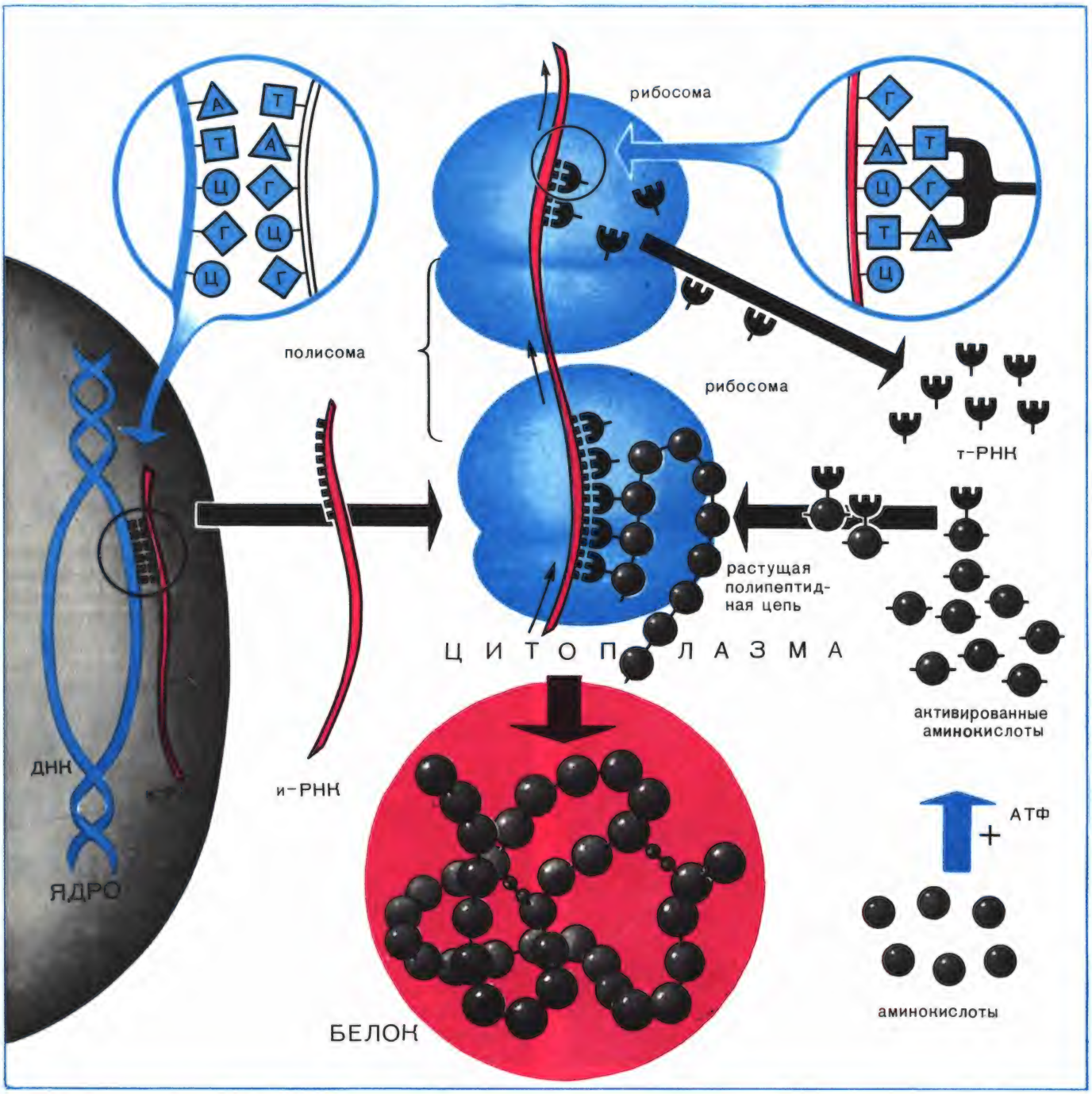
Конечно, одного свойства самовоспроизведения еще недостаточно, чтобы ДНК могла определять передачу наследственных признаков. Была выяснена другая важная особенность этих полимеров: последовательность мононуклеотидов в молекуле ДНК определяет последовательность аминокислот в синтезируемых организмом белках, в первую очередь в ферментах. Эту зависимость включения в белок той или иной аминокислоты от определенной последовательности нуклеотидов обычно называют *генетическим кодом*. Каковы его особенности? Во-первых, каждой аминокислоте соответствует определенная последовательность трех расположенных рядом нуклеотидов — так называемых *триплетов нуклеотидов*. Например, триплет ТТТ (в рибонуклеиновой кислоте ему отвечает триплет УУУ) соответствует аминокислоте фенилаланину, триплет ГЦУ — аланину и т. д. Нужно отметить, что большинство аминокислот кодируется двумя-тремя сходными триплетами. Определенные триплеты являются как бы сигналами начала или конца образования пептидной цепи белка (фермента). Таким образом, все многообразие растений, животных и человека закодировано в очень длинных молекулах дезоксирибонуклеиновых кислот.

Отсюда становятся понятны роль и строение гена, само существование которого еще недавно пытались отвергать некоторые ученые. Ген состоит из ДНК, в которой закодировано строение какой-то пептидной цепи (в частности, строение какого-то фермента).

Как создается новая молекула белка

Передача наследственной информации сводится к механизму регуляции биосинтеза белков. Сейчас принципы такого механизма уже выяснены (рис. 8).

Строение синтезируемого белка, как мы уже говорили, предопределяется строением определенного участка соответствующей (содержащей несколько тысяч оснований) молекулы ДНК, находящейся в хромосомах клеточных ядер. Каждой аминокислоте соответствует определенный триплет нуклеотидов. При синтезе новой молекулы белка протекает несколько процессов. На молекуле ДНК, как на матрице, синтезируется особая, более короткая (содержащая обычно несколько сотен мономеров) молекула рибонуклеиновой кислоты (РНК), содержащая рибозу вместо дезоксирибозы, а вместо основания тимина — урацил. Эта молекула РНК выполняет роль передатчика информации, ее так и называют *информационной рибонуклеиновой кислотой* (и-РНК). В отличие от скрученной из двух ниток ДНК она представляет собой длинную одноцепочечную молекулу. Образовавшаяся молекула и-РНК несет на себе часть информации, хранящейся в длинной молекуле ДНК. Информация находится в более удобной для чтения форме — это как бы телеграфная лента с нанесенными на ней знаками, подобными азбуке Морзе. Только в азбуке Морзе три элемента: тире, точка и промежуток, а здесь четыре: А, Г, Ц, У. Длинная лента с закодированной записью поступает в особый клеточный аппарат — рибосомы. Они состоят из белков и нуклеиновых кислот. Обычно и-РНК проходит последовательно через несколько рибосом, которые временно связываются ею в особые агрегаты — полисомы, своего рода конвейеры, на которых происходит «сборка» белка из соответствующих «деталей» — аминокислот. В процессе «сборки» рибосомы медленно вращаются. Однако для «сборки» эти «детали» (аминокислоты) должны быть специально подготовлены. Предварительно путем взаимодействия с особым веществом аденозинтрифосфатом — АТФ, в котором все организмы накапливают энергию, они активизируются, превращаясь в аминоациладенилаты (ААА). Затем эти активированные аминокислоты под влиянием специальных ферментов вступают во взаимодействие с третьим типом нуклеиновых кислот — так называемыми *транспортными рибонуклеиновыми кислотами* (т-РНК). Транспортные РНК относительно самые короткие нуклеиновые кислоты. Каждая из кислот содержит около 80 нуклеотидов, и ее молекулярный вес около 25 000. Существует более 20 различных т-РНК, каждая из которых способна присоединить лишь одну определенную аминокислоту и «перевозить» ее к месту «сборки». Впрочем, для некоторых аминокислот уже найдено по две и более т-РНК, но пока неясно различие их функций. После того как специфическая т-РНК присоединила свою определенную аминокислоту, образовавшиеся комплексы (т. е. транспортные т-РНК, «нагруженные» аминокислотами) также поступают в рибосому или си-



стему рибосом — полисому. Таким образом, на «автоматический конвейер», т. е. в полисому, поступают «подготовленные детали» (аминокислоты, связанные с т-РНК) и «план сборки» (информационная РНК).

В рибосомах есть специальные участки («склад деталей»), где временно удерживаются различные т-РНК, содержащие определенные аминокислоты, вплоть до того момента, когда в соответствии с «планом» данная аминокислота должна быть включена в создающуюся на рибосоме пептидную цепь. Полипептидная цепь всегда строится присоединением аминокислот по карбоксильным группам начатой цепи. Когда «сборка» белковой молекулы закончена (этот момент определяется появлением в и-РНК специального триплета УАА, кодирующего окончание биосинтеза данного белка), белковая молекула выходит из рибосомы, соответствующим образом свертывается — белок готов к функционированию.

На разных этапах в биосинтезе белка участвуют различные ферменты, осуществляющие многочис-

Рис. 9. Частицы вируса табачной мозаики (снимок сделан с помощью электронного микроскопа).

Рис. 10. Частицы вируса (снято с помощью электронного микроскопа методом двойного оттенения). Для сравнения приведена фотография правильного двадцатигранника — икосаэдра. Сравнение показывает, что вирус кристаллизуется в такой же форме.

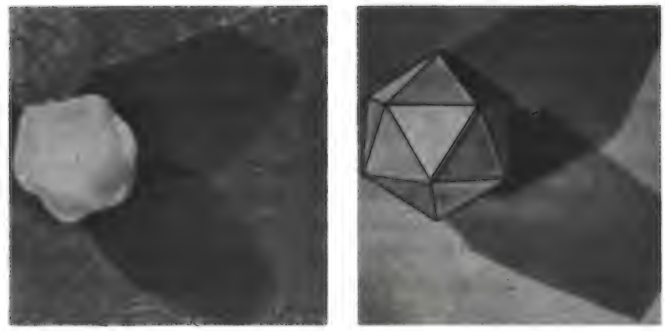
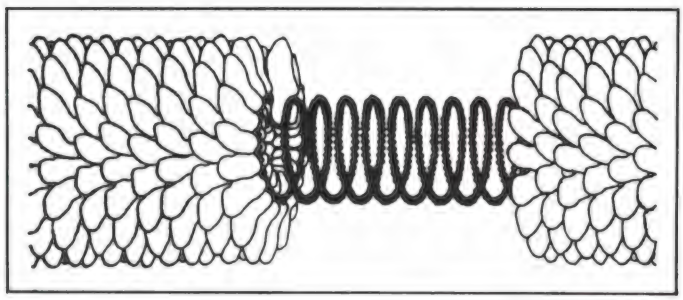


Рис. 11. Схематическое изображение частицы вируса табачной мозаики. Внутри расположена спираль ДНК, снаружи белковый чехол. Часть белковых молекул удалена, чтобы показать спиральную структуру ДНК.



ленные функции. Они обеспечивают присоединение аминокислоты к соответствующей т-РНК, другие осуществляют образование молекулы и-РНК и т. д.

Изучив механизм передачи наследственности и биосинтеза белка, ученые поняли причины многих явлений, не имеющих ранее объяснений и казавшихся не связанными друг с другом.

Что такое мутации

Мутации — наследственно закрепляемые изменения каких-то особенностей организма — имеют громадное значение для эволюции. Их причина — изменение строения одного или нескольких оснований в каком-то участке ДНК, из-за чего изменяется строение синтезируемого в соответствии с этим белка, а тем самым изменяются какие-то особенности организма. Очень сильной способностью вызывать мутации обладают рентгеновские лучи, радиация, сопровождающая атомный взрыв, некоторые токсические вещества. В большинстве случаев мутации вредны для организма и нередко приводят к его гибели, но изредка появляются и новые полезные свойства. До настоящего времени получение и использование мутаций велось чисто эмпирически, но успехи в познании наследственного аппарата позволяют надеяться, что в недалеком будущем удастся направленно создавать полезные мутации и подавлять образование вредных.

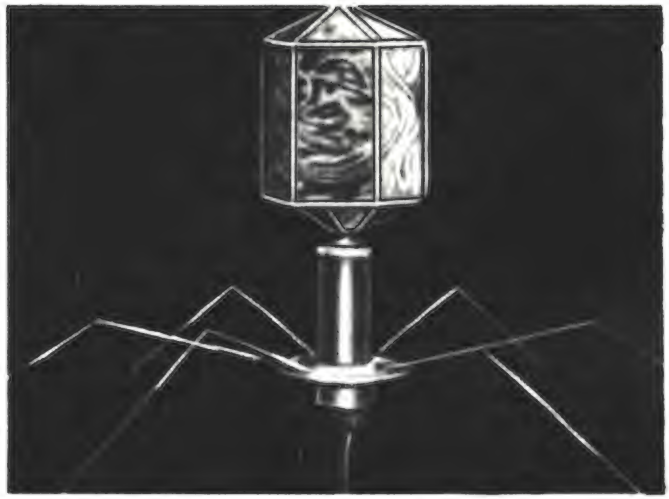
Чем опасны вирусы

Вирусы — простейшие образования — являются пограничными формами жизни. По многим своим свойствам они отличаются от бактерий и других микробов. Например, вирусы способны существовать в кристаллической форме (рис. 9, 10). Но у них отсутствуют такие важные признаки живого, как собственный аппарат обмена веществ. В то же время у вирусов крайне сильно выражена способность к размножению, и в этом их колоссальная опасность: именно вирусы являются причинами очень тяжелых и трудно излечимых болезней человека, животных, растений (бешенство, энцефалиты, грипп, ящур, мозаичная болезнь табака и др.). В то же время некоторые вирусы (бактериофаги) очень полезны, так как уничтожают опасные болезнетворные бактерии.

Как же размножаются вирусы? Они построены из белка (он составляет их наружную часть, являясь как бы чехлом) и нуклеиновой кислоты (рис. 11).

Рис. 12. Бактериофаги до прикрепления к бактериальной клетке: *слева* — электронная микрофотография; *справа* — модель («автоматический шприц» подготовлен к работе).

Рис. 13. Бактериофаги после прикрепления к бактериальной клетке: *слева* — электронная микрофотография; *справа* — модель («шприц» сработал, нуклеиновая кислота впрыснута в бактериальную клетку).



В большинстве вирусов содержится ДНК, но есть вирусы, в которых находится РНК. При проникновении вируса в организм нуклеиновая кислота тем или иным путем попадает в клетку; например, бактериофаги (вирусы, поражающие некоторые бактерии) действуют как автоматический шприц, впрыскивая свою нуклеиновую кислоту в клетку организма-хозяина (рис. 12, 13).

Когда вирусная нуклеиновая кислота попадает в клетку организма, чувствительного к данному вирусу, происходят глубочайшие изменения в ее функционировании. Собственная ДНК клетки распадается и перестает функционировать, вирусная ДНК (или РНК) полностью захватывает контроль за процессами размножения. Используя имеющиеся в клетке хозяина синтезирующие механизмы, она путем синтеза новых, соответствующих вирусной ДНК, молекул и-РНК заставляет клетку синтезировать нужные вирусу белки клеточной оболочки и нужные ферменты. Одновременно с лихорадочной быстротой образуются новые молекулы вирусной ДНК, которые самопроизвольно соединяются с бел-

ками чехла, создаются новые вирусные частицы. Вскоре пораженная вирусом клетка разрушается, и множество новых вирусных частиц устремляется в атаку на другие клетки организма-хозяина. Из этого ясно, что борьба с вирусами очень сложна. Многие организмы имеют защитные средства; в частности, клетки животных могут вырабатывать специфические белки — интерфероны, способные связывать и обезвреживать любую чужеродную нуклеиновую кислоту, попавшую в организм. Сейчас изыскивают средства, которые бы стимулировали образование интерферонов в организме. Так, можно ввести в организм искусственно полученные полинуклеотиды, которые не опасны для организма, но способны вызвать ответную реакцию — образование интерферонов.

Можно ли искусственно создать живое?

Насколько реальным является следующий этап изучения — искусственное создание (синтез) различных биополимеров и их комплексов, т. е. искусственное воспроизведение без участия клетки белков (гормонов и ферментов), нуклеиновых кислот, генов, вирусов? Насколько близки мы к искусственному воспроизведению хотя бы простых форм живого?

Уже синтезирован ряд белковопептидных гормонов (в том числе состоящий из 51 аминокислоты инсулин, регулирующий обмен сахаров; его недостаток вызывает тяжелое заболевание — диабет). Синтезирован также и первый фермент — рибонуклеаза. При этом в определенном порядке были соединены 124 аминокислоты. Эти синтезы прежде всего важны тем, что убедительно доказали принципиальную приложимость разработанных методов для искусственного получения белков. Большие успехи достигнуты и в искусственном получении нуклеотидов. Короткие полинуклеотиды (содержащие по 3—4 мононуклеотида) удается получать химически, а их «сшивание» для получения длинных полинуклеотидов, которые могут играть роль информационных РНК, удается осуществлять вне клетки с помощью выделенных очищенных ферментов. Более того, сочетая химические и ферментативные методы, удалось получить длинный полидезоксинуклеотид (аналог ДНК), который можно рассматривать как *первый ген*!

Можно ожидать, что в недалеком будущем ученые осуществят синтезы вирусных нуклеиновых кислот и вирусных белков. Тогда можно будет получить искусственно первичные пограничные формы жизни. Еще раньше, вероятно, удастся провести химические или ферментативные изменения строения вирусов. Например, удлинить (или укоротить) на несколько звеньев молекулу вирусной ДНК, что изменит ее биологические свойства. Это может вызвать образование «ослабленных» вирусов, которые можно будет использовать в качестве прививок для создания иммунитета. Но, к сожалению, могут возникнуть новые, еще более опасные вирусы. Если их использовать в качестве новых видов оружия, это приведет к страшным для человечества последствиям.

Изменяя строение ДНК (т. е. генов), можно будет менять природу микроорганизмов, вырабатывающих множество ценных продуктов — витамины, антибиотики, аминокислоты и т. д. В дальнейшем аналогично можно будет, вероятно, направленно менять природу растений и животных. Все эти открытия перспективны для человечества при условии, если они будут использованы в мирных целях.

Конечно, искусственное получение вирусов еще не будет означать синтеза живой клетки, так как у вируса отсутствуют многие признаки живого, в частности способность к автономному обмену веществ. Он может размножаться («жить») только в условиях живой клетки. Искусственно получить полноценную живую клетку (или даже ее упрощенную модель) исключительно сложно: ведь она содержит большое число различных ферментов, нуклеиновых кислот, специальных жироподобных веществ — липидов. Эти липиды входят в состав ряда мембран, отделяющих клетку от наружной среды и изолирующих одни части клеток от других.

Изучение мембран — еще одно важное направление в познании химии живого. Именно мембраны из-за их удивительной избирательной проницаемости обеспечивают саму возможность функционирования клетки. Сейчас уже созданы первые представления о структуре мембран, появились методы регулирования проницаемости мембраны. Например, найдены вещества, под влиянием которых мембраны пропускают ионы калия, но не натрия, разрабатываются общие принципы действия мембраны.

Все перечисленные успехи достигнуты в 1965—1972 гг. Можно предполагать, что дальнейшее развитие исследований в химии живого приведет к открытию новых перспектив в биологии, медицине, сельском хозяйстве, микробиологии.

Химия пищи

Все живое питается и с пищей получает вещества, необходимые для построения и возобновления тканей и клеток, снабжения их энергией. Энергия нужна организмам для осуществления множества химических процессов синтеза.

Пищей зеленых растений (хотя и не всех) служат чисто неорганические вещества, которые всасываются корнями из почвы в виде раствора солей и усваиваются зеленой листвой из воздуха в виде углекислого газа. Некоторые растения — сапрофиты (в том числе грибы) — не способны включать углерод из углекислого газа воздуха в органические вещества своего тела. Они живут за счет органических веществ (остатков растений), попадающих в почву.

Многие одноклеточные организмы (такие, как дрожжи) используют углерод уже готовых органических соединений, но азот и фосфор — элементы, необходимые для всякой жизни,— поглощают в виде неорганических солей. Высшие животные и человек не могут питаться только неорганическими материалами (не считая солей), а едят или растения, или животных, или и то и другое.

Зеленые растения — это исходный пищевой материал для всего живого (кроме некоторых микроорганизмов). Растениями питаются травоядные животные. Хищные животные поедают других животных. Большинство людей питаются смешанной пищей, хотя есть большие группы людей (иногда целые народы), которые в силу естественных причин или традиций питаются только животной или только растительной пищей.

Пища человека должна содержать следующие химические элементы: *углерод, водород, кислород, азот, фосфор, серу,* селен, фтор, *хлор,* иод, *натрий, калий, кальций, магний,* цинк, медь, хром, молибден, марганец, *железо,* кобальт. Элементы, которые не выделены курсивом, требуются человеку в ничтожных количествах — несколько миллиграммов или даже несколько десятых долей миллиграмма в сутки. Зеленые растения усваивают (впитывают корнями) все элементы в виде водного раствора их солей (для азота — в виде солей аммония) или солей соответствующих кислородных кислот — фосфорной, азотной, серной и т. д. Углерод растения усваивают в хлоропластах зеленых листьев в виде углекислого газа, поглощенного из воздуха.

Человек также способен усваивать многие элементы в виде их солей или солей соответствующих кислородных кислот. Сюда относятся фосфорная кислота и соли, образуемые элементами в вышеприведенном списке — от фтора до кобальта.

Углерод, азот, серу человек и животные должны получать только в виде определенных групп органических соединений. Эти соединения всегда содержат также кислород и водород, которые поступают в организм, кроме того, в виде воды.

Кроме воды и минеральных солей человек и животные нуждаются в четырех основных группах веществ, входящих в пищу. Это *углеводы, жиры, белки* и *витамины.* Углеводы и жиры — главный источник пополнения энергией человеческого тела. Многие вещества, необходимые для образования тканей, строятся с участием переработанных в организме углеводов (главным образом сахара и крахмала) или жиров (животные или растительные масла, сало). Взрослый человек, выполняющий работу, не связанную со значительными физическими нагрузками, должен получить с пищей запас энергии (в пересчете на тепловую), равный 2500—3000 ккал, а занимающийся физическим трудом — около 4000 ккал. 1 кг безводного жира, например растительного масла, приносит 9000 ккал, 1 кг углеводов — крахмала или сахара (это главные углеводы нашей пищи) — 3770 ккал.

Жиры и углеводы в пище в некоторой степени взаимозаменяемы и играют сходную роль. Белки или протеины (например, творог, белок яйца, клейковина пшеничной муки, мышцы рыбы, мяса) служат единственными органическими веществами пищи, которые доставляют человеку и животным необходимый азот. Ни в какой другой форме азот человеком не усваивается. Между тем он нужен и для синтеза белков собственного тела человека, и для построения азотсодержащих веществ, например: красного вещества крови — гема, нуклеиновых кислот (веществ, хранящих наследственность и программу синтеза белков в каждой клетке), многих гормонов, регулирующих разные стороны обмена веществ в организме. Очень малая часть из 2500—4000 калорий, нужных человеку в сутки, покрывается за счет окисления белка. Главная часть белков расходуется на синтез белков нашего тела. Взрослому человеку нужно в сутки около 100 г белка. Часть съеденного белка, окисляясь, разрушается и превращается, подобно углеводам и жирам, в конечном счете в углекислый газ, выдыхаемый человеком. При окислении белков их азот превращается в мочевину и выводится из организма с мочой.

Прежде чем перейти к последней и самой малой по весу части пищевого рациона человека — витаминам, нужно познакомиться с химией пищеварения. Это поможет глубже понять значение для организма качества белковой пищи.

Разжеванная, смоченная слюной пища через глотку и пищевод попадает в желудок, где перемешивается с желудочным соком, содержащим соляную

кислоту и фермент пепсин, ускоряющий переваривание белка, его гидролиз. Переваривание крахмала, содержащегося в картофеле и овощах, хлебе и кашах, также совершается в желудке. И оно сводится к гидролизу, т. е. к расщеплению с помощью воды громадных молекул полимера — крахмала на тысячи молекул мономеров — глюкозы (виноградного сахара). Глюкоза из тонких кишок проникает прямо в кровь. Она служит топливом, доносимым кровью до каждой клетки тела. В клетках путем сложного процесса окисления за счет кислорода, также переносимого кровью (красным гемоглобином крови), глюкоза выделяет энергию тепла и работы в нашем теле.

Переваривание белка идет более сложно. Огромные молекулы белка с помощью соляной кислоты и пепсина разрываются, присоединяя воду, на осколки — *полипептиды*. Затем содержимое желудка переливается в примыкающую к желудку двенадцатиперстную кишку. Сюда же вливаются выделяемые поджелудочной железой ферменты — трипсин, химотрипсин, карбоксипептидаза и производимая печенью желчь.

В отличие от желудка переваривание в двенадцатиперстной кишке происходит не в кислой, а в щелочной среде, но смысл его тот же — гидролиз. Полипептиды распадаются на *аминокислоты*. Из двенадцатиперстной кишки перевариваемая пища попадает в тонкие кишки, на ворсинках стенок которых происходит окончательное расщепление на аминокислоты (ферментом аминопептидазой и др.) всех еще не до конца переваренных осколков белковых молекул и всасывание аминокислот в кровь. Кровь доносит аминокислоты — основной строительный материал тела — до каждой клетки, а клетка синтезирует из этих аминокислот белки, нужные ей и всему организму (см. ст. «Химия жизни»).

Желчь необходима для переваривания жиров. Жиры гидролизуются на глицерин и жирные кислоты. Глицерин растворим в воде, а жирные кислоты — нет. Желчь их эмульгирует — разбивает на мельчайшие капельки, образуя по внешнему виду подобную молоку жидкость. Ворсинки тонких кишок могут всасывать жирные кислоты только в виде таких капелек. Затем жирные кислоты и глицерин поступают в кровь и в клетках окисляются или подвергаются различным превращениям.

Мы уже знаем, что громадные молекулы разных белков построены из 20 различных аминокислот (см. ст. «Химия жизни»). Некоторые белки в одной своей молекуле содержат тысячи таких аминокислотных кирпичей, другие — больше, третьи — меньше. Не все белки перевариваются человеком. Не перевариваются волосы, перья, сами пищеварительные ферменты: пепсин, трипсин, химотрипсин.

Необычайно важно, что из 20 аминокислот человеческий организм не может сам синтезировать 8 так называемых *незаменимых аминокислот*, а организм ребенка даже 9. Зато, если пища содержит достаточно азота в виде других аминокислот или в виде даже просто соли аммония, организм человека (и животных) может сфабриковать остальные 9—10 сортов, причем сырьем могут служить и промежуточные продукты превращения в теле углеводов и жиров. Поэтому важно не только суточное количество белковой пищи (т. е. 100 г белка, которые содержат 16 г азота), но и качество. Эти 100 г белковой пищи должны содержать в сумме около 30 г незаменимых аминокислот, притом строго определенное минимальное количество каждой из них. Очень важно, чтобы 11—12 г азота в виде остальных заменимых кислот или хотя бы одной из них имелись в пище (обычно мы ведь не едим солей аммония). В таблице 1 дан список аминокислот, составляющих белки нашей пищи, и количество каждой, необходимое для нормального питания. В отношении заменимых аминокислот эти числа имеют условный характер, так как они могут заменять друг друга.

Белки содержатся в каждой клетке животного, растения и микроорганизма.

Большое значение имеет не только вес белка, но и его состав, т. е. процентное содержание незаменимых аминокислот в белках разных пищевых продуктов (см. таблицу 2).

Больше всего потребность человека в незаменимых аминокислотах удовлетворяют белки молока и яиц, достаточно удовлетворительны белки мяса, из растительных белков хороши белки сои. Белки пшеничной муки бедны лизином. Зато в белке гороха лизина значительно больше.

Наиболее дефицитны незаменимые аминокислоты: лизин, триптофан и метионин. Лизин и метионин получают на заводах и добавляют в корм животным, для которых недостаток незаменимых аминокислот так же вреден, как и для человека. В некоторых странах искусственно приготовленный лизин добавляют в хлеб. Если питаться только белым хлебом, то в сутки его надо съедать 2500 г, чтобы покрыть потребность человека в лизине; потребность во всех остальных аминокислотах и углеводах при этом будет перекрыта, и человек получит 8600 калорий вместо требуемых 3000. Если же добавить лизин (3—5 г — суточная норма человека), то можно будет ограничиться 1 кг хлеба в день без вреда для здоровья. Конечно, можно достигнуть,

Таблица 1

Средняя суточная потребность взрослого человека в пищевых веществах

Пищевое вещество	Суточная потребность
Вода, г	1750—2200
Белки, г	80—100
Незаменимые аминокислоты, г:	
триптофан	1
лейцин	4—6
изолейцин	3—4
валин	4
треонин	2—3
лизин	3—5
метионин	2—4
фенилаланин	2—4
Итого	21—31
Заменимые аминокислоты, г:	
гистидин	2
аргинин	6
цистеин	2—3
тирозин	3—4
аланин	3
серин	3
глутаминовая кислота	16
аспарагиновая кислота	6
пролин	5
гликокол	3
Итого	49—51
Всего аминокислот	70—82
Углеводы, г	400—500
в том числе:	
крахмал	400—450
сахар	50—100
балластные вещества (клетчатка и пектин)	25
Жиры, г	
Полиненасыщенные жирные кислоты:	3—6
холестерин	0,3—0,6
фосфолипиды	5
Общая калорийность, ккал	3000
Минеральные вещества, мг:	
кальций	800—1000
фосфор	1000—1500
натрий	4000—6000
калий	2500—5000
хлориды	5000—7000
магний	300—500
железо	15
цинк	10—15
марганец	5—10
хром	2—2,5
медь	2
кобальт	0,1—0,2
молибден	0,5
селен	0,5
фториды	0,5—1,0
иодиды	0,1—0,2
Витамины, мг:	
C (аскорбиновая кислота)	70—100
B_1 (тиамин)	1,5—2,0
B_2 (рибофлавин)	2,0—2,5

Пищевое вещество	Суточная потребность
PP (никотиновая кислота)	15—25
B_3 (пантотенат)	5—10
A (различные формы)	1,5—2,5
B_6 (пиродоксин)	2—3
B_{12} (кобаламин)	0,005—0,080
Биотин	0,15—0,3
Холин	500—1000
D (различные формы)	0,04
P (рутин)	25
B_9 (фолиевая кислота)	0,1—0,5
E (различные формы)	2—6
K (различные формы)	2
Липоевая кислота	0,5
Инозит	0,5—1,0

как говорят, сбалансированного питания, комбинируя в пище белковые продукты так, чтобы недостаток той или иной незаменимой кислоты в одном продукте покрывался избытком в другом. Например, есть хлеб с сыром или яйцом. Однообразная пища, например кукуруза, которая особенно бедна лизином, вызывает специфические тяжелые болезни. От этих болезней страдает население Южной Америки, они широко распространены в Африке и некоторых странах Южной Азии.

Другая аминокислота, которой часто не хватает в продуктах питания, особенно в зерновых,— метионин. Метионин и цистеин — аминокислоты, которые содержат серу. Первая — незаменимая, вторая может быть заменена метионином. Белки нашего тела тоже содержат серу в виде этих двух аминокислот. Особенно много серы в волосах, ногтях, а у птиц — в перьях. Метионин необходим для нормальной работы печени, поэтому врачи назначают метионин как лекарство при болезнях печени. Довольно много метионина в белках обычной и цветной капусты, но самого-то белка в капусте всего около 2%. Третьей дефицитной незаменимой аминокислоты — триптофана — много в твороге, яйцах, дрожжах.

Последняя группа веществ пищи — витамины. С витаминами дело обстоит так же, как с незаменимыми аминокислотами. Каждый из примерно 20 витаминов совершенно необходим для жизни человека. Для каждого витамина установлена минимально необходимая суточная норма. Если организм долго не получает необходимой порции, то это приводит к расстройству здоровья — так называемому авитаминозу, специфическому для каждого витамина. Наиболее известная болезнь для жителей Севера — цинга, вызываемая недостатком витамина C (аскорбиновой кислоты). Она развивается у людей, надолго

Таблица 2

Содержание белка в различных пищевых продуктах

Продукт	Белок, %
Молоко:	
коровье	3,5
женское	1,4
Сыр:	
чеддар	23
плавленый	9,0
Говядина	17
Свинина	15,2
Баранина	15,7
Куры вареные	20,6
Треска	16,5
Яйца	12,8
Пшеничная мука	10,5
Рис	7,6
Горох сухой	23,8
Соя	34,9
Кукуруза	10,0
Картофель	2,0
Капуста	1,4
Морковь	1,2
Дрожжи (БВК — белково-витаминный концентрат)	45
Икра зернистая	23

Заливное и отварное мясо, зернистая икра, рис, макароны и жареный картофель получены искусственно. Как вы видите, синтетическая пища даже внешне мало отличается от естественной.

лишенных свежих фруктов и овощей — главных источников витамина С.

Однако есть существенная разница между незаменимыми аминокислотами и витаминами.

Аминокислоты необходимы для построения всех тканей нашего организма, и нужно их довольно много — десятки граммов. Витамины нужны для другой цели — они входят в состав некоторых ферментов. Ферменты — это катализаторы, т. е. вещества, ускоряющие и направляющие химические реакции, создаваемые самим организмом. Однако для некоторых ферментов необходимо получить в пище готовую часть их молекулы, которую организм сам не может синтезировать. Это и есть витамин. Витаминов нужно человеку в сутки мало, обычно несколько миллиграммов, иногда даже доли миллиграмма. Лишь витамина С нужно довольно много, до 100 мг, еще больше — холина, до 1 г (о роли каждого витамина см. ст. «Обмен веществ» в т. 7 ДЭ). В целом суточная потребность человека в разных составных частях пищи приведена в таблице 1 (стр. 503).

Из солей человек вносит в пищу обычно лишь хлористый натрий — поваренную соль. Все остальные необходимые ему минеральные соли содержатся в достаточном количестве в растительной пище, и их приходится добавлять только в исключительных случаях. Так, отсутствие иода в почве некоторых горных местностей ведет к тому, что и растения лишены этого элемента. В таких районах человек болеет зобом. А там, где вода не содержит достаточно солей — фторидов, люди страдают кариесом зубов.

Кроме необходимых составных частей пища содержит еще вкусовые и пахучие вещества, либо свойственные пище, либо возникающие при ее приготовлении (печении, жаренье, варке). Соль, чеснок, лук, горчицу, перец и другие пряности специально добавляют в пищу для придания ей особого запаха или вкуса. Интересно, что главные пищевые вещества — белок, крахмал и жиры — в совершенно очищенном виде безвкусны и лишены запаха. При нагревании же белков с углеводами совершаются химические превращения и появляются «печеные» и «жареные» запахи, которые можно искусственно воспроизвести, нагревая ту или иную аминокислоту с тем или другим сахаром (углеводом). В результате такой обработки цистина получается запах жареного мяса. Вся смесь, нагреваемая для этой цели, такая: аминокислоты — цистин, глицин, глутаминовая кислота; углеводы — глюкоза, ксилоза и вода. Нагревание смеси аминокислот: цистина, аланина, глутаминовой кислоты, глицина — и углеводов: глюкозы, арабинозы — с водой и окисью триметиламина дает запах жареной рыбы.

Можно легко воспроизвести запах хлеба, какао. Наши органы вкуса различают лишь четыре вкуса — сладкий, кислый, соленый, горький и их комбинации. Такие приправы, как лук, хрен, горчица, перец, добавляют чисто осязательное ощущение, «остроту», «шипучесть». Вся остальная аппетитность пищи обусловлена запахами летучих веществ, образующихся при химических взаимодействиях (при печении или жаренье), или содержанием в пище душистых веществ, например плодов, ягод.

В настоящее время запахи, которые всегда обусловлены смесью летучих, пахучих веществ, можно проанализировать и затем воссоздать. Анализируют вещества запахов с помощью приборов — газожидкостных хроматографов. Смесь пахучих веществ пищи, например сыра, в струе газа проходит через длинный столб нагретого пористого материала, смоченного нелетучей жидкостью, которая в разной степени поглощает и удерживает разные вещества запаха и таким образом делит их. Сравнивая время удерживания какого-либо из веществ запаха с временем удерживания заведомых образцов веществ, можно установить природу каждого из веществ запаха и судить о его количестве. Смешав все (или только главные) из веществ, обусловливающих запах, воспроизводят и запах данного сорта пищи или напитка.

Есть интенсификаторы вкуса. Самые известные — натриевая соль глутаминовой кислоты (аминокислота, о которой уже было рассказано) и две из нуклеиновых кислот — инозиновая и гуаниловая, которые можно выделить, например, из дрожжей. Добавленные в небольших количествах в пищу, они усилива-

ют и улучшают ее вкус. Так, слабый раствор смеси инозиновой кислоты и натриевой соли глутаминовой кислоты имеет вкус крепкого бульона. Действительно, при варке супа или бульона эти вещества переходят в суп и бульон и обусловливают их аппетитный вкус. В Японии широко пользуются добавкой в пищу натриевой соли глутаминовой кислоты. Склянки с этим порошком ставят на столах, и каждый добавляет его в суп по вкусу. Найдены и другие интенсификаторы вкуса.

Возникает вопрос: можно ли приготовлять пищевые продукты не сельскохозяйственным, а заводским путем? Вот как отвечал на этот вопрос Д. И. Менделеев в начале нашего столетия (в то время многое из сказанного в этой статье было еще неизвестно): «Как химик, я убежден в возможности получения питательных веществ из сочетания элементов воздуха, воды и земли помимо обычной культуры, т. е. на особых фабриках и заводах, но надобность в этом еще очень далека от современности, потому что пустой земли еще везде много... и я полагаю, что при крайней тесноте народонаселения раньше, чем прибегать к искусственному получению питательных веществ на фабриках и заводах, люди сумеют воспользоваться громадной массой морской воды для получения массы питательных веществ, и первые заводы устроят для этой цели в виде культуры низших организмов, подобных дрожжевым, пользуясь водою, воздухом, ископаемыми и солнечной теплотой».

Как мы сегодня ответим на тот же вопрос? Известно, что из веществ, перечисленных в таблице 1 (стр. 503), можно составить питательную смесь. Такой смесью можно кормить человека достаточно долго без вреда для здоровья. Эту смесь не нужно переваривать в желудке и кишках, так как она состоит из тех веществ, в которые пища превращается уже в результате переваривания. Такую смесь можно есть, и она без переваривания будет всасываться в тонких кишках и переходить в кровь. Ее можно и прямо вводить в кровь, вливая в вену: так больным вводят раствор глюкозы. Понятно, какое значение это имеет для тех больных, которые вследствие тяжелой болезни или ранения не могут питаться обычным образом, через желудочно-кишечный тракт. Есть и такие наследственные болезни, при которых в пище должна отсутствовать та или иная ее составная часть (например, аминокислота фенилаланин). У некоторых детей от рождения в организме отсутствует фермент, способный окислять аминокислоту фенилаланин в другую аминокислоту — тирозин. Мозг ребенка развивается неправильно. Но вот из пищи устраняют фенилаланин, и ребенок развивается нормально. Такую диету можно составить только искусственно из смеси всех остальных необходимых для питания веществ.

А как со здоровыми?

Очевидно, что здоровый человек требовательнее к вкусу и аппетитности пищи. Между тем, как мы уже рассказали, вкус любой пищи можно воспроизвести и даже сделать его с помощью интенсификаторов более аппетитным, чем у привычных нам блюд. Приходится позаботиться и о форме, консистенции пищи. Все это также можно сделать. В США в продаже имеются вегетарианские, т. е. безубойные, ветчина, курятина, мясо, по вкусу и консистенции очень напоминающие настоящие. Волоконца, подобные волоконцам мяса, склеенные в цельный кусок, готовят из белков бобов сои. По аминокислотному составу эти белки очень близки к животным белкам. Их растворяют и превращают в нити и волоконца подобно тому, как это делают с синтетическим волокном, только волоконца получают короткие, их склеивают. Из сои получают также искусственные молоко, простоквашу и другие молочные продукты. Однако белки сои и так полноценны, а получают сою, возделывая поля, т. е. обычным сельскохозяйственным путем. А можно ли пищу получать на заводах?

Самой дорогой по стоимости и самой недостающей частью питания является ее белковая часть. Специалисты считают, что около половины населения земли недополучает необходимое количество белков. В результате недоедания и голода возникают болезни (особенно в странах Южной Америки, Африки, Азии). Есть два пути пополнения мировых запасов белка кроме сельскохозяйственного. Первый — чисто химический: можно химически получить все необходимые аминокислоты и на их основе готовить пищу, похожую на привычную, добавляя вкусовые вещества и запахи и придавая ту или другую форму — волоконцев (как в мясе и рыбе), студня, крупы, макарон, сплошной массы — мягкой или более жесткой, как это бывает в паштетах или в сыре. Аминокислоты можно получать и не чисто химическим путем, а с помощью микроорганизмов, синтезирующих большие количества той или другой аминокислоты. Так, например, на заводах получают аминокислоты — лизин и глутаминовую кислоту, избыток которых из микроорганизмов попадает в раствор, в котором они живут. Но ведь все микроорганизмы содержат в своих клетках белки и в них весь набор аминокислот. Таковы, например, разные виды дрожжей. Это и будет второй путь увеличения белковых ресурсов на Земле. Можно разрушить клетки этих микроорга-

низмов, выделить белок и использовать его для приготовления пищи или, прогидролизовав его, превратить в сумму аминокислот и использовать их для получения пищи, добавив, конечно, вкусовые вещества и отдушку. Дрожжи растут на сахаристых отходах сельского хозяйства и, как это установлено недавно, на углеводородах нефти, если добавить необходимые соли — аммония, фосфорной кислоты и др. (см. ст. «Органические вещества вокруг нас»). Выращивая дрожжи на углеводородах нефти, можно из одной тонны нефти получить полтонны белка. Белок дрожжей гораздо ближе по аминокислотному составу к белкам мяса и молока, чем белок многих растений. Из такого дрожжевого белка в Институте элементоорганических соединений Академии наук СССР получена искусственная черная икра и мясо (жареное). На вкус их не отличишь от обыкновенных. Конечно, те же и всякие другие белковые продукты можно сделать и из смеси аминокислот, полученных чисто химическим путем.

В чем выгоды такого получения белковой пищи? Дрожжевой белок будет дешевле, чем животный белок. Азот и фосфорная кислота, добавляемые в виде солей, используются дрожжами несравненно полнее, чем растения используют вносимые в почву удобрения. В самом деле, в сельском хозяйстве значительная часть удобрений пропадает зря: вымывается дождями, не доходит до корней; не все растение, скажем пшеница или кукуруза, идет в пищу. Многие части растения — корни, солома, шелуха, кочерыжки — пропадают; азот, фосфор, калий идут на все части растения, а не только на зерно. Если растение идет на корм животному, то из белка корма только 20—30% после убоя животного оказывается в виде мяса. Остальной белок служит животным для поддержания собственной жизни.

На производство белка полусинтетическим путем тратится нефть. Чтобы досыта накормить всех только дрожжевым белком, нужно гораздо меньше нефти, чем для одного лишь автотранспорта, но все же запасы нефти не могут быть неистощимы, хотя геологи открывают все новые месторождения. Возникает общий вопрос: сумеем ли мы заменить нефть, если запасы ее истощатся? Когда мы овладеем реакцией термоядерного синтеза, т. е. сможем регулировать выделение той колоссальной энергии, которая мгновенно выделяется, например, при взрыве водородной бомбы, то нам будет доступно использование неограниченных количеств энергии. Нефть и уголь перестанут быть поставщиками энергии. Они будут поставщиками только углерода для химической промышленности. Их с избытком хватит и для пищи.

Есть, однако, еще одна возможность, не связанная ни с нефтью, ни с ядерной энергией. Можно выращивать зеленые микроорганизмы — одноклеточные водоросли, которые, как и зеленые высшие растения, используют углерод углекислого газа, превращая последний в органические вещества с выделением кислорода за счет солнечной энергии. Дело в том, что микроорганизмы, как дрожжи, так и водоросли (типа хлореллы), растут несравненно быстрее, чем высшие многоклеточные организмы — растения или животные. А белок водорослей можно перерабатывать во вкусную пищу так, как это уже начинают делать с белком дрожжей, добавляя недостающие аминокислоты, недостающие витамины и вкусовые вещества. Водоросли, так же как и зеленые растения суши, получают необходимый им углерод из углекислого газа, на этот раз растворенного в воде. Поглощая световую энергию солнца, водоросли, как и зеленые листья других растений, углерод углекислого газа соединяют с водой в углеводы (отсюда и название — углеводы), а кислород выбрасывают в атмосферу.

Мысль об обеспечении человечества изобилием продуктов питания давно занимала многих химиков. В экспериментальных работах по синтезу пищевых продуктов надо использовать все открытия, чтобы выяснить, какие лучше и экономичнее. Нужно, конечно, улучшать и всячески интенсифицировать земледелие. По статистическим данным, население земного шара к 2000 г. удвоится и превысит шесть миллиардов человек. Пищи потребуется гораздо больше, а ее и сейчас на земном шаре не хватает, особенно белка.

Новое

(О новых последних открытиях, о новых загадках, о новых поисках решения старых загадок)

В этой небольшой главе, добавленной перед самым отправлением тома в типографию (март 1973 г.), рассказывается о некоторых, самых последних, достижениях разных областей науки о веществе и движении. Но многое еще требует проверки. Думается, что вам будет очень интересно проследить дальнейшее развитие этих открытий, а может быть, и самим принять в этом участие.

Новые наблюдения и открытия

Десять миллиардов атмосфер с помощью лазера

Советские физики открыли способ создания давлений порядка *десяти миллиардов* атмосфер (около 10^{15} Па). При таком чудовищном давлении твердое вещество должно сжиматься в *тридцать раз*. Это было достигнуто при помощи сферически симметричного облучения дейтериевой мишени лазерным излучением. Мишень разогревалась до 60 млн. градусов. Одновременно возникали нейтроны, что указывает на возможность термоядерной реакции с использованием лазерных систем.

Металлический алмаз

Созданы установки, на которых получают рекордные постоянные давления в несколько миллионов атмосфер (свыше 10^{11} Па). Это помогает физикам сильно расширить границы исследований состояния различных веществ.

Особенно интересные результаты получены при изучении влияния высоких давлений на кристаллы алмаза.

Оказалось, что электрическое сопротивление алмаза уменьшается более чем в миллион раз, что, повидимому, указывает на переход алмаза в металлическое состояние.

Самая низкая температура

Ученые США получили пока самую низкую температуру — она всего на две-три миллионных кельвина выше абсолютного нуля. Такая температура получена в результате исследований упорядоченной атомной структуры гелия-3.

Лазерный луч разделяет изотопы

Современная техника нуждается в чистых изотопах многих элементов. Ядерной технике нужен уран-235, для термоядерных процессов — тяжелый водород; биология и агрономия в своих исследованиях уже не могут обойтись без тяжелого кислорода ^{18}O, без тяжелого азота, без изотопов серы. Физико-химические свойства различных изотопных соединений одного и того же элемента настолько близки между собой, что различие еле ощутимо. Приходится создавать гигантские многоцикловые технологические схемы, в которых тысячекратно, на тысячах ступеней повторяются одни и те же операции, что и позволяет накопить за счет ничтожных изменений изотопного состава в одной ступени большое обогащение. Процесс идет на гигантских заводах с огромной затратой энергии. Используют или различие в скоростях диффузии, или центробежную силу в центрифугах, совершающих тысячи оборотов в секунду, или ничтожные различия в химических свойствах элементов.

Советские исследователи сделали открытие, которое, возможно, совершит полный переворот во всей промышленной технологии разделения изотопов. Была создана новая конструкция лазеров с плавно изменяемой частотой излучения. Частоты колебаний молекулярных спектров лежат в инфракрасной области и зависят от изотопного состава молекулы. Если настроить инфракрасный лазер на частоту колебаний молекулы, в которой содержится нужный исследователю изотоп, то благодаря резонансу можно избирательно подействовать на нужную молекулярную связь и разрушить ее.

Это было осуществлено на процессе разделения изотопов азота. Обычный аммиак состоит из смеси двух аммиаков, один из которых содержит легкий изотоп — азот-14, другой — тяжелый — азот-15. Химически эти аммиаки почти неразличимы. Луч инфракрасного лазера, настроенного на частоту излучения молекул тяжелого аммиака, был пропущен через сосуд со смесью двух аммиаков. Затем смесь была подвергнута мощному импульсу облучения другим лазером с частотой в ультрафиолетовой области. При этом возбужденные молекулы аммиака с атомами тяжелого изотопа были разрушены, а «легкие» молекулы остались невредимыми. Химически отделить аммиак от продуктов его разрушения не составляет никакого труда.

Так, однократное облучение лазерными лучами заменило тысячи повторных операций в гигантских цехах современных заводов по разделению изотопов. Самое замечательное в этом открытии то, что лазер-

ный луч, оказывается, может стать в руках химика универсальным средством тончайшей перестройки молекул.

Открытие антигелия

Физики уже давно твердо установили, что у каждой элементарной частицы существует свой, как бы зеркальный двойник — античастица. Античастицы сходны между собой, но некоторые их свойства обратны по знаку. Самую первую античастицу в космических лучах обнаружил академик Скобельцын. Она вела себя настолько странно, что только через несколько лет американский физик К. Андерсон установил, что это были античастицы электрона, получившие название «позитрон». Позднее на большом ускорителе в Беркли (США) были открыты антипротон и антинейтрон. Затем в Женеве было обнаружено ядро атома тяжелого антиводорода — антидейтрон. На одном из самых больших в мире ускорителей в Серпухове (СССР) было открыто ядро атома легкого изотопа антигелия — антигелий-3.

Таким образом, доказано, что в мире существуют все элементарные античастицы, необходимые для построения антиматерии, и уже открыты ядра простейших антиатомов антидейтерия и антигелия. Этим подтверждается возможность существования во Вселенной антивещества.

Впервые сгусток антиматерии был получен в Новосибирске: интенсивный пучок позитронов в вакууме.

«Печка» «Лунохода»

Замечательным советским автоматическим станциям «Луноход-1» и «Луноход-2» предстояло работать на Луне в очень тяжелых условиях. Температура поверхности лунной почвы лунным днем поднимается до $+130^\circ$ С, а лунной ночью опускается до -170° С.

Чтобы вся сложнейшая аппаратура автоматической станции могла работать нормально и совершенно безотказно, чтобы не могла выйти из строя ни одна система радиосвязи и была бы обеспечена абсолютная надежность, полная автономность и безотказная работа всей установки в течение многих месяцев — огромные температурные перепады недопустимы. Для нормальной работы всех приборов внутри «Лунохода» должна поддерживаться почти постоянная оптимальная температура. Для этого он снабжен удивительной «печкой» — компактной, легкой и совершенно безотказной. «Топливом» в ней служит искусственный радиоактивный изотоп полоний-210. Его получают в атомном реакторе, облучая в течение длительного времени металл висмут. Полоний-210 распадается наполовину за время достаточно длительное, чтобы обеспечить теплом «Луноход» во время работы его на Луне, но и достаточно короткое, чтобы выделялось нужное количество тепловой энергии. Период его полураспада равен 138 дням. При распаде он выделяет частицы и очень в малой степени γ-лучи и нейтроны. Изотоп полония-210 очень удобный тепловой источник не только для работы в космосе, но и в земных условиях — не нужна радиационная защита.

Благодаря полониевой «печке» наш «Луноход-1» успешно проработал на Луне одиннадцать лунных суток или почти десять с половиной земных месяцев, прошел по Луне 10 540 м, 20 тыс. раз сфотографировал лунную поверхность, выполнил 500 измерений свойств лунного грунта и 25 анализов химического состава лунных пород. Правда, на «Луноходе» есть еще солнечные батареи, которые работают лунным днем и обеспечивают энергией всю его аппаратуру, но в течение лунной ночи они безжизненны.

Безотказная изотопная «печка» «Лунохода» — замечательное достижение советских ученых и инженеров.

Чем были пробиты шлемы космонавтов

Шлемы американских космонавтов были изготовлены из поликарбонатного материала лексан. После полета в космосе шлемы были тщательно изучены. В них обнаружили сквозные треки космических частиц, в среднем по три пробоины на каждые 2 см^2 поверхности. После полета корабля «Аполлон-12» у всех трех космонавтов было одинаковое число космических пробоин, хотя один из них оставался в кабине, а два других высаживались на Луну.

При полете корабля «Аполлон-8», проходившем в период большой солнечной активности, число треков в шлемах космонавтов было значительно меньше, что можно объяснить усилением магнитного поля Солнца, сильнее отклоняющего на себя потоки космических лучей. Частицы высоких энергий, пронизывающие шлемы космонавтов,— это чаще всего ионизированные атомы элементов, занимающих в таблице Менделеева места под номерами 24—28: хром, марганец, железо, кобальт, никель. Значит, эти элементы, как считают исследователи, тоже присутствуют в космическом пространстве.

Обнаруженные дозы проникающего космического излучения пока безопасны для космонавтов. Но при

длительных полетах ими уже нельзя пренебрегать. Если экспедиция на Марс займет два года, то примерно пять из каждых 1000 клеток сетчатки глаза будут поражены, что уже опасно.

Совершенно необычайный сплав

В одной из лабораторий США исследователи работали со спиралью, изготовленной из сплава титана с никелем. Спираль была растянута под большой нагрузкой и превратилась в прямую проволоку. Потом она случайно была нагрета. На глазах у пораженных экспериментаторов проволока вдруг сама собой снова свернулась в спираль. Так было открыто удивительное свойство некоторых сплавов, содержащих титан, «запоминать» свою форму и снова ее восстанавливать при нагревании.

Любое изделие из нитинола (так был назван этот необычайный сплав) можно нагреть и охладить, затем как угодно смять, скрутить, до неузнаваемости деформировать. А если изделие снова нагреть, то оно немедленно примет свою прежнюю форму. Никто не знает, чем это можно объяснить.

Новые и старые нерешенные загадки

Старая великая загадка

Не следует думать, что наука решает все возникающие перед ней задачи по мере их появления. Существует много таких принципиальных проблем, которые столь же стары, как стара сама физика, но до сих пор они не нашли решения.

Каждый школьник, изучающий физику, уже знает, что законы взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов совершенно одинаковы. А именно: сила взаимодействия электрических зарядов (магнитных полюсов) прямо пропорциональна произведению зарядов (полюсов) и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

В чем же тогда разница между электрическими зарядами и магнитными полюсами? При попытке дать ответ на этот вопрос мы сразу сталкиваемся с одной из наиболее глубоких загадок во всей современной физике: оказывается, что заряд квантован! Заряд электрона наименьший. Положительные заряды протонов в точности равны заряду электрона и отличаются только по знаку. Наименьший заряд в принципе нельзя разделить на еще меньшие части. Все заряды, всюду, во всей Вселенной всегда являются целыми кратными заряда электрона. Причины этого (если они существуют) неизвестны. Попутно отметим, что массы не квантуются. Хотя и известно, что существуют элементарные частицы, массы которых нельзя разделить на более мелкие части, их массы не составляют целого кратного от какой-то наименьшей. Почему — мы тоже не знаем.

Мы пока не знаем, квантуются ли магнитные полюса. Они существуют в природе только в виде диполей: двух противоположных полюсов, соединенных вместе. Разрезав поперек любой магнит, обязательно получим два новых магнита, и у каждого будет опять по два полюса. Физики-теоретики уже давно выдвинули гипотезу о возможности существования монополей — магнитных «зарядов» одного знака. Но физики-экспериментаторы, несмотря на все усилия, уже в течение нескольких десятилетий найти их не могут. Существуют ли отдельные магнитные полюсы — монополи, мы не знаем.

Кварки — новая нерешенная загадка

Очень много внимания уделяют физики элементарным частицам: электронам, протонам, нейтронам, образующим атомы и их ядра. Кроме них найдено еще много других нестабильных элементарных частиц, распадающихся после образования. При столкновении элементарных частиц друг с другом происходят различные процессы превращения одних частиц в другие. Название «элементарные частицы» означает, по-видимому, только то, что мы еще не знаем их структуры.

Уже известно много десятков элементарных частиц с разными свойствами, с разной массой и разными зарядами. Их множество, и законы их взаимного превращения стали загадкой. И вдруг оказалось, что все свойства элементарных частиц и их античастиц, все их отличительные признаки можно очень хорошо описать и свести все их множество в одну стройную систему, если предположить, что они построены из очень малого числа первичных частиц — всего только трех. Эти три частицы (и их античастицы) были названы *кварками* (это странное слово было заимствовано из одного фантастического романа — так кричали фантастические птицы). Пришлось приписать этим выдуманным, гипотетическим частицам очень странные свойства: кварки должны иметь *дробные* электрические заряды, равные $^1/_3$ и

$^2/_3$ заряда электрона. Не менее странными должны быть и их остальные свойства.

Гипотеза кварков многое объяснила в физике элементарных частиц. Многие теоретические предсказания на основе этой теории блестяще оправдались.

Но усердные поиски кварков, которые много лет упорно ведут физики всего мира, пока безуспешны. Никто еще не знает, где и как их искать. Каковы свойства частиц с дробным зарядом? Какова их химия? Как же можно их собрать и изучить? Может быть, поэтому они до сих пор и не найдены.

Последние поиски кварков советскими физиками с помощью одного из самых больших в мире ускорителей в Серпухове дали отрицательные результаты.

Но все же никто не может еще сказать, что кварков в мире нет. Надо их искать.

Самая главная сила Вселенной

Два электрона, находясь на расстоянии одного метра, отталкиваются друг от друга с силой $2{,}6 \cdot 10^{-29}$ Н (сосчитайте и проверьте). Эти же два электрона, на том же расстоянии, притягиваются благодаря гравитационному взаимодействию с силой $5{,}6 \cdot 10^{-73}$ Н. Следовательно, гравитационное взаимодействие чрезвычайно слабое. Оно приблизительно в $4 \cdot 10^{42}$ раз (!) слабее, чем электростатическое. Силы притяжения — самые слабые силы во Вселенной. Но в то же время гравитацию можно назвать самой главной силой в мире. Электрическое взаимодействие отсутствует у нейтральных, незаряженных тел. Для тяготения нет исключений. Все, что существует в природе, ему подвержено. Все тела притягивают друг друга. Кванты света, обладая массой, также притягиваются тяжелыми телами. Световые лучи изгибаются и отклоняются, проходя мимо таких тел.

Природа сил гравитации остается загадкой. Попытки физиков построить их теорию рождают множество вопросов. Существуют ли кванты гравитации — гравитоны? Где и как их искать? Возможна ли антигравитация? Возможны ли волны гравитации? Существуют ли частицы с отрицательной массой? Они должны иметь скорость больше скорости света! Физики для них уже придумали название — тахионы.

«Черные дыры»

Теория предсказывает, что звезды с массой в десятки раз больше Солнца после выгорания в них водорода и гелия, после исчерпания запаса звездного горючего, когда ослабевает внутризвездное световое давление, поддерживавшее звезду в равновесии, должны резко сжаться. С уменьшением размеров звезды силы тяготения резко возрастают. Существует такой критический радиус звезды, при котором ничто, никакое излучение, попавшее в ее сферу притяжения, не может вырваться «наружу». Эта сжавшаяся, коллапсировавшая звезда поглощает все, всякое излучение, но сама ничего не испускает. Такое фантастическое, страшное космическое тело получило образное название — «черная дыра». «Черную дыру» увидеть нельзя, но ее чудовищная масса должна влиять на соседние звезды, и по их поведению можно обнаружить присутствие «черной дыры». Астрофизики ищут их в космосе.

Волны гравитации

Особенно упорно и настойчиво физики США и СССР пытаются обнаружить приходящие из космоса гравитационные волны. Эти волны должны возникать при изменении расположения больших космических масс и распространяться со скоростью света. Они должны излучаться при вращении двойных звезд, при столкновении плотных звезд.

Результаты сложных экспериментов американских исследователей как будто бы подтверждают существование вспышек гравитационного излучения, нерегулярно повторяющихся несколько раз в месяц и излучаемых из центра Галактики. Если эти опыты верны, то мощность гравитационного излучения из центра Галактики в миллион раз превышает мощность всех видов излучения, вместе взятых.

Некоторые физики считают, что только столкновение «черных дыр» может стать причиной выделения такой энергии в виде гравитационных волн. Поверить в это трудно.

Где кончается химия

Там, где начинается сверхплотное вещество, там химия, как мы ее понимаем, кончается. Что такое ядра галактик — ответить трудно. Это сверхмассивные объекты. Не просто очень большие — очень плотные звездные группировки вроде шаровых скоплений, как полагали астрономы еще четверть века назад. По данным последних астрофизических наблюдений, диаметры галактических ядер, возможно, меньше светового года, а средняя плотность вещества там в миллионы раз выше, чем в шаровых скоплениях. Не исключена возможность, что ядра галактик состоят

из сверхплотного вырожденного вещества. В таком случае ядро галактики, подобно нейтронной звезде, должно быть сплошным атомным ядром гигантских размеров: нейтроны, протоны, более тяжелые барионы. А химия, как известно, наука об элементах... Впрочем, это не означает, что химические понятия и закономерности для ядра галактики абсолютно неприемлемы. Термодинамические понятия здесь, бесспорно, продолжают действовать.

Еще одна загадка нейтрино

Нейтрино — самая загадочная из всех элементарных частиц: масса его равна нулю; скорость равна скорости света; длина свободного пробега больше видимых размеров Вселенной. Возникает нейтрино в ядерных реакциях вместе с позитроном, в реакциях β-распада вместе с электроном образуется антинейтрино. Никто не знает, куда они исчезают. Физики все же сумели поймать эту неуловимую частицу. Они воспользовались тем, что антинейтрино способно реагировать с протоном. При этом возникают позитрон и нейтрон, а их можно обнаружить. Вероятность такой реакции исчезающе мала. От мощного атомного реактора удалось зарегистрировать около трех отсчетов в час. Но все же удалось.

Но все попытки обнаружить поток нейтрино от Солнца, где в гигантских масштабах протекают ядерные реакции, пока окончились неудачей. От Солнца к нам на землю нейтрино не приходят. Куда же они деваются? Может быть, мы неправильно представляем себе, что происходит на Солнце? Это совершенно невероятно. Может быть, нейтрино до Земли не доходят? Была высказана гипотеза, что наши представления о природе нейтрино неверны и что на самом деле это нестабильная частица, продолжительность жизни которой меньше 500 с. Столько времени ей необходимо, чтобы долететь от Солнца до Земли.

Что же с ней по дороге происходит? Во что она превращается?

Невероятно!

Опубликованы два странных сообщения. Они относятся к разным областям физики, но в обоих затрагиваются самые основы современного естествознания и оба совершенно невероятны.

Радиоастрономы обнаружили в космосе два квазара, которые, судя по их спектрам, удаляются от нас со скоростями, значительно превышающими скорость света: один — в четыре, другой — в шесть — десять раз. Пока нет доказательств, чтобы подвергать сомнению основной постулат современной физики.

Возникло сомнение: постоянна ли постоянная Планка — одна из фундаментальных констант природы, которая связывает энергию кванта с частотой световой волны? Возникло сомнение: одинаково ли значение постоянной Планка в разных частях Вселенной? Если оно не одинаково, то свет, приходящий к нам из очень далеких областей, не будет поглощаться межзвездным газом в нашей Галактике, так как кванты этого «чужого» света будут отличны от квантов «нашего» света. Исследования спектра излучения далекого пульсара Крабовидной туманности показали, что оно, по-видимому, не испытало никакого поглощения. Похоже, что постоянная Планка для пульсаров отличается от постоянной Планка для межзвездного газа.

Обоим сообщениям поверить трудно. Может быть, их не подтвердит более тщательная проверка. Может быть, будет найдено простое объяснение.

А может быть, вам придется еще раз пересматривать основы современной физики.

Конечно, этим не исчерпываются все открытия и все нерешенные загадки.

Справочный отдел

Всему миру — одну меру

(Международная система единиц — СИ)

В жизни, особенно в науке и технике, людям часто приходится измерять различные физические величины — *длину, массу, время* и т. п. Физическая величина, например длина палки, масса камня, температура воды,— одно из свойств этих физических тел. Чтобы измерить какую-либо величину — массу камня или глубину реки, ее сравнивают с известной величиной, выбранной в качестве единицы,— *килограммом, метром.* Результат измерения выражают числом единиц, содержащихся в измеряемой величине, например: масса камня 10 кг, глубина реки 3 м. Измерения позволяют количественно сравнивать масштабы, свойства предметов и явлений.

Чтобы измерить расстояние между городами, урожай зерна, объем воды, нужны единицы этих величин, с которыми можно было бы их сравнивать. Расстояние или длину можно измерить количеством шагов или сравнить их с размерами различных частей человеческого тела — рук, ног. В древних государствах Вавилонии, Египте, Греции единицей длины был локоть — длина руки человека от локтя до кончиков пальцев. В Древней Руси единицами длины были: сажень — расстояние между концами пальцев разведенных в стороны рук (рис. 1); аршин, равный примерно длине руки. Но так как длина локтя, размах рук у разных людей различны, то локти, футы, сажени у разных народов несколько отличались друг от друга. Локоть в Египте равнялся 0,45 м, а в Греции — 0,51 м.

В средние века в каждом европейском государстве были свои собственные меры длины, массы и объема, существенно отличавшиеся друг от друга. Разнообразие единиц очень усложняло торговлю, обмен товарами и сведениями. Переводить одни единицы в другие было гораздо труднее, чем переводить с одного языка на другой. И люди понимали, что все народы и государства должны иметь одинаковые единицы физических величин.

Международная система единиц

Первый решительный шаг к единой для всех стран и народов системе единиц был сделан после Великой французской революции 1789 г. Тогда в Европе почти в каждом государстве была своя система единиц, свои меры. Французские ученые разработали новую систему мер — *метрическую* — и предложили всем странам принять ее. Идея метрической системы была гениально проста. Система счисления — деся-

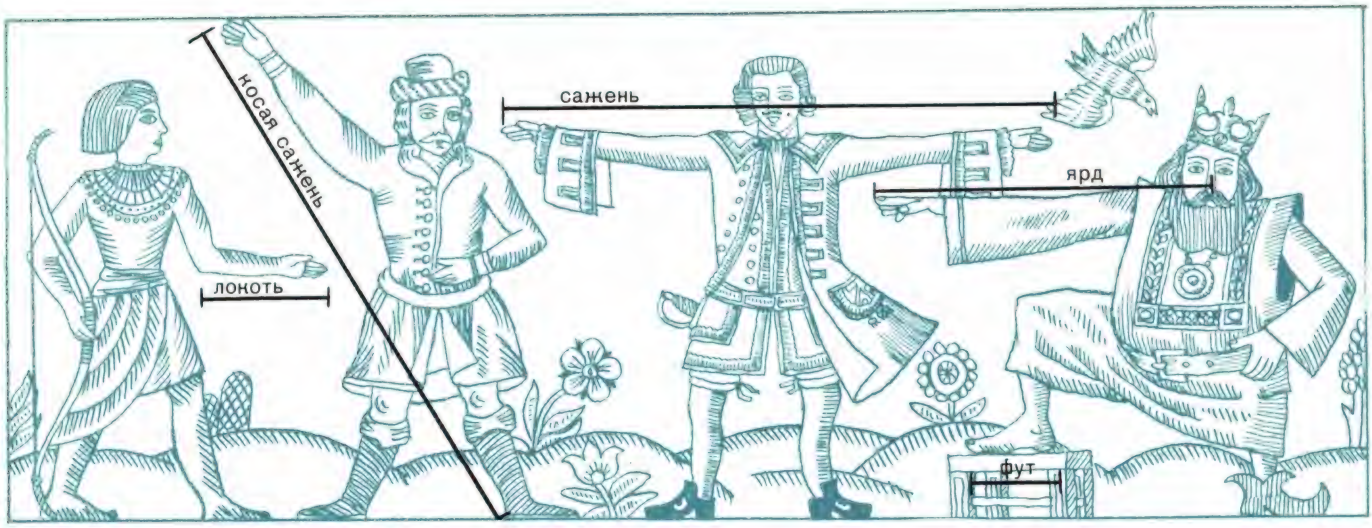


Рис. 1.

Рис. 2. Эталон массы — 1 кг, хранится в Архиве Франции.

тичная, единица длины — метр, равный одной сорокамиллионной части меридиана Земли, проходящего через Париж.

Все остальные единицы физических величин, необходимые для того времени, предложили сделать производными из единицы длины — метра — и на основе физических свойств самого распространенного вещества на Земле — воды.

С помощью геодезических измерений с максимальной точностью была определена длина Парижского меридиана на участке от Дюнкерка до Барселоны. Эти измерения заняли много лет. Одна сорокамиллионная часть длины Парижского меридиана была названа словом *метр* (в переводе с греческого — «мера»). Из твердого и прочного сплава платины с иридием был изготовлен эталон метра, хранящийся и поныне в Архиве Франции (Архивный метр).

За единицу массы была принята масса 1 $дм^3$ воды при 4° С, названная *килограммом*. Из платино-иридиевого сплава изготовили эталон килограмма (рис. 2).

Копии этих эталонов, тщательно изготовленные и сверенные с Архивными, были затем разосланы во все страны. Есть эти копии и у нас, они стали государственными эталонами метра и килограмма и хранятся во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева в Ленинграде.

За единицу времени была принята *секунда*, равная 1/86400 доле суток — времени обращения Земли вокруг своей оси. Таким образом, все основные единицы могли быть в любое время сверены с естественными «эталонами» — размером земного шара, временем его оборота вокруг своей оси, массой кубического дециметра воды. Другие единицы, например площади, скорости и т. п., образовывались от основных: квадратный метр, метр в секунду и т. п.

В нашей стране метрическая система мер принята декретом Совета Народных Комиссаров в 1918 г.

Но, несмотря, казалось бы, на простоту и однозначность метрической системы мер, к началу XX в. в науке и технике появился целый ряд метрических систем единиц. Различались они выбором основных единиц. Так, в системе СГС за основные единицы были приняты сантиметр, грамм, секунда; в других: МКГСС — метр, килограмм-сила, секунда; МТС — метр, тонна, секунда. Создатели каждой из этих систем доказывали, что их система самая удобная. Как бы то ни было, переход от одной системы к другой был затруднителен, единицы в различных системах сильно отличались друг от друга. Единица электрической емкости в системе СГС равна емкости шарика радиусом 1 см, а в практической системе МКСА — емкости «шарика» радиусом... 9 млн. км (фарада). Изучение, запоминание множества единиц всех этих систем и переход от одних к другим были бичом не только для школьников и студентов, но и для инженеров и ученых. Так или иначе, в научно-технических справочниках тех времен приходилось приводить правила перевода одних единиц в другие для нескольких десятков единиц массы, объема жидких и сыпучих тел, единиц длины.

Стала очевидной необходимость замены всех этих систем одной, универсальной системой.

Для введения новых систем или единиц и их эталонов периодически собираются международные генеральные конференции по мерам и весам. В 1960 г. XI Генеральная конференция утвердила и рекомен-

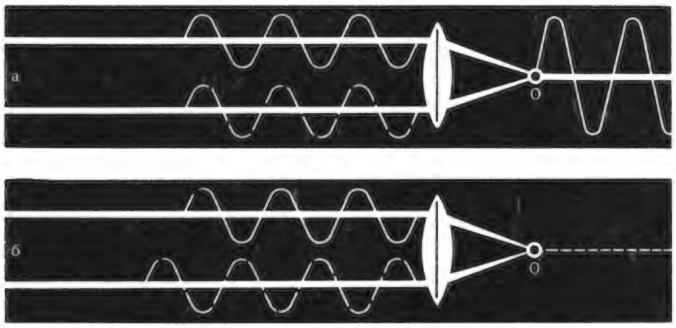


Рис. 3.

довала всем странам пользоваться Международной системой единиц СИ (Система Интернациональная). Единицы Международной системы (СИ) положены в основу государственного стандарта СССР «Единицы физических величин». В СИ имеется *семь* основных единиц, из которых могут быть образованы всевозможные единицы любых физических величин. Вот ее основные единицы — *метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, моль.*

Метр (м) — единица длины. Архивный метр оказался короче сорокамиллионной доли парижского меридиана. Еще более неприятным оказалось, что метр и его эталоны (копии), разосланные в разные страны, изменились со временем в результате перекристаллизации в сплаве. Ученые обнаружили это, измеряя длины эталонов при помощи световых волн. При этом они открыли, что длина волн света, излучаемого атомами некоторых элементов, гораздо постояннее, чем длина металлического эталона метра. С помощью специальных приборов — интерференционных компараторов можно измерить длину эталона, сравнивая ее с длиной световой волны. Особенно пригодной для этой цели оказалась длина волны оранжевой линии спектра, излучаемого инертным газом криптоном-86 при пропускании через него электрического тока,— она наиболее постоянна и легко измерима. Длина этой волны принята за естественный эталон единицы длины — метра. Метр теперь определяется так: метр есть длина, равная 1 650 763,73 длины волны оранжевого излучения криптона-86. Металлические эталоны метра проверяют, измеряя число световых волн, укладывающихся на их длине. По эталонам метра изготавливают линейки, концевые меры длины, калибры и другие измерительные инструменты.

Чтобы понять, как сравнивают эталон метра с длиной волны света, надо знать физику, в особенности оптику (см. ст. «Свет»). Из волновой оптики известно, что если световые волны, отраженные, например, от двух зеркал, приходят в одну точку и при этом разность их путей равна нулю или составляет четное число полуволн, то в этой точке амплитуды волн складываются и интенсивность света усиливается. Если же эта разность равна нечетному числу полуволн (волны приходят в точку в противоположной фазе), то их амплитуды вычитаются и интенсивность света резко уменьшается (рис. 3).

Интерференционный компаратор — сложнейшее и точное устройство. Основная его схема такова: на массивной оптической скамье устанавливают два зеркала, одно из них может перемещаться при помощи винта (рис. 4). Плоскость перемещаемого зеркала точно совмещают с плоскостью неподвижного. На оба зеркала направляют по узкому лучу света от криптоновой лампы, отраженные от зеркал лучи сводят линзой в одну точку и наблюдают за ее освещенностью. Когда плоскости обоих зеркал точно совмещены, разность хода между отраженными лучами равна нулю, а в точке мы увидим светлое пятно. Стоит сдвинуть верхнее зеркало (подвижное) вправо на четверть световой волны, как отраженный от него луч придет в точку с разностью хода на одну полуволну, и в точке не будет видно света — он погасится благодаря интерференции; если верхнее зеркало сдвинуть еще вправо на четверть волны — луч придет в точку с разностью хода в две полуволны, и свет в точке усилится. Расстояние между поверхностями зеркал при этом будет равно половине длины световой волны. Наблюдатель постепенно передвигает верхнее зеркало и подсчитывает число усилений и ослаблений освещенности пятна, точки. И когда он насчитает 3 301 527,46 таких изменений освещенности, расстояние между поверхностями зеркал станет точно равным 1 м. Сосчитать более 3 млн. изменений освещенности трудно, поэтому чаще всего таким методом измеряют не целый метр, а эталон в 1 или 10 см. Государственный эталон метра СССР представляет собой сложный комплекс аппаратуры, включающий криптоновую лампу, фотоэлектрический интерферометр и другие необходимые приборы. Эталон создан и хранится в Институте метрологии им. Д. И. Менделеева.

Точность любого измерения определяется точностью определения или воспроизведения единицы измерения или ее эталона. Эталон метра может быть проверен и воспроизведен с точностью до одной стомиллионной его доли. Это пока наивысшая достижимая точность самых точных линейных измерений.

За единицу массы — *килограмм* (кг) — в СИ принята масса платино-иридиевого эталона, хранящегося в Международном бюро мер и весов. Прежнее определение килограмма как массы 1 литра воды при 4° С тоже оказалось неточным. Масса 1 литра воды при 4° С на 28 мг меньше, чем изготовленный во Франции эталон килограмма. Но в отличие от платино-иридиевого эталона метра масса эталона килограмма практически совершенно не меняется со временем, и сравнить эталон килограмма с его копиями можно с большой точностью — до несколь-

ких миллиардных долей. Это позволило положить его в основу принятого в СИ определения килограмма: килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

На практике, в обычной жизни, люди еще часто употребляют слово «вес», имея в виду массу тела: вес человека 56 кг, вес спутника 86 кг. Между тем понятия «вес» и «масса» совершенно различны. Согласно определению механики, *масса* есть мера инерционности тел, или мера гравитации. Масса тела тем больше, чем больше число атомов или нуклонов в теле. *Вес* же есть сила, с которой тело действует на опору или подвес, мещающий ему падать под действием силы тяжести. *Сила тяжести* есть сила, с которой Земля или другое небесное тело притягивает к себе данное тело. Сила тяжести равна произведению массы тела на ускорение свободного падения. На Луне, где ускорение свободного падения в 6 раз меньше, чем на Земле, во столько же раз будет меньше вес земного килограмма. А на Юпитере в 2,4 раза больше, на Солнце — больше в 28 раз! Масса же, например, эталона килограмма во всех этих случаях не изменится. Наконец, на борту космического корабля-спутника Земли вес любого тела в состоянии невесомости практически равен нулю. Даже на Земле в разных ее местах вес тела одной и той же массы не одинаков, так как не везде одинаково ускорение свободного падения. Земля не идеальный шар, она немного сплюснута у полюсов и к тому же еще вращается. Вблизи полюсов ускорение силы тяжести равно 9,83 м $с^2$, на экваторе — 9,78 м/$с^2$. Вес тела можно определить только с помощью пружинных весов (динамометра), удлинение пружины которых пропорционально приложенной силе. При «взвешивании» тел на рычажных весах мы измеряем не вес тела, а его массу, сравнивая ее с массой гирь, и результат такого измерения совершенно не зависит от значения ускорения силы тяжести и будет одинаковым в любой точке Земли или даже на Луне или другой планете.

Единица времени — *секунда* (с) — самая древнейшая, она ведет свое происхождение от системы измерения времени, изобретенной в древнем Шумерском царстве и Вавилоне. В сутках — полном обороте Земли вокруг своей оси — 24 ч, в часе — 60 мин, в минуте — 60 с, в полных сутках — 86 400 с. Точные исследования показали, что Земля вращается вокруг своей оси неравномерно. Неравномерно и ее вращение вокруг Солнца. И эта неравномерность была замечена учеными с помощью точнейших часов, ими созданных. Это не механические обычные часы, по которым мы узнаем время. Ученые создали точнейшие кварцевые часы — сложнейший радиотехнический прибор. В них использовано свойство кварцевой пластинки, вырезанной из кристалла горного хрусталя, совершать строго определенное число колебаний в секунду. С помощью этих часов и были измерены и неравномерность, и периоды обращения Земли вокруг оси и вокруг Солнца. В настоящее время созданы еще более точные атомные часы. Если атому цезия-133 сообщить избыточную энергию (как говорят физики — возбудить его), то атом Cs-133 испускает обратно эту избыточную энергию в виде электромагнитного излучения, частота и период которого строго постоянны и совершенно одинаковы для любых атомов Cs-133.

По периоду и частоте излучения Cs-133 с высокой точностью можно контролировать правильность «хода» кварцевых часов. Осуществляется это с помощью очень тонких и сложных методов квантовой радиофизики и радиоспектроскопии (см. ст. «Радиофизика»).

Поэтому XIII Генеральная конференция по мерам и весам в 1968 г. утвердила новое определение секунды: секунда — 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 (переходу атома цезия из возбужденного в обычное состояние). Такое определение секунды с помощью естественного «эталона» — периода излучения атома цезия — повысило точность прежнего определения единицы времени — секунды — и точность измерения промежутков времени еще в 10 раз.

Практически время определяют и измеряют с помощью хронометров — механических, электрических, кварцевых, сверяемых по сигналам точного времени, которые передаются по радио. Эти сигналы подаются крупнейшими радиостанциями мира с помощью кварцевых часов, сверяемых с атомными цезиевыми часами. Эти сложные и точные радиотехнические устройства — хранители времени — устанавливают в крупных обсерваториях, метрологических центрах. Именно оттуда эти часы передают сигналы точного времени на радиостанции, которые транслируют их на весь мир.

Ампер (А) — единица силы электрического тока. Эта единица устанавливается на основе открытого Ампером фундаментального закона о взаимодействии электрических токов, протекающих по параллельным проводникам. Ампер — это сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м, вызывает между этими проводниками силу притяжения, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н (ньютона) на каждый метр длины проводников. Для воспроизведения ампера (А) используют эталонные токовые весы

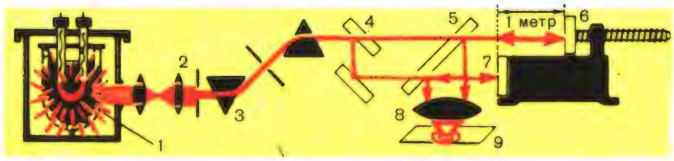


Рис. 4. Схема измерения длины метра с помощью световых волн. Криптоновая лампа (*1*), погруженная для поддержания стабильности излучения в сосуд с жидким азотом. Линзы и коллиматор (*2*) формируют свет лампы в узкий пучок. Призмы (*3*) и коллиматор выделяют из спектра криптона-86 его оранжевую линию. Полупрозрачное зеркало (*4*) раздваивает световой пучок; часть лучей проходит через полупрозрачные зеркала (*4* и *5*) и отражается от зеркала (*6*); другая часть лучей, отраженная зеркалами (*4*), пройдет через зеркало (*5*) и отразится от зеркала (*7*). Лучи, отраженные от зеркал (*6* и *7*), отразятся и от зеркала (*5*), пройдут через линзу (*8*) и совместятся в одной точке на экране (*9*).

(рис. 5). Ток пропускают через две катушки: одна из них неподвижна, а другая прикреплена к коромыслу точных весов. Подвижная катушка может втягиваться внутрь неподвижной, когда через них пропускают ток. Силу втягивания можно очень точно измерить, уравновесив ее весом гирь на другом плече коромысла весов. Определенный таким образом ампер не нуждается в естественном «эталоне», так как он установлен посредством единиц длины и силы. Конечно, можно было бы определить единицу силы тока (ампер) или единицу количества электричества (кулон) естественным «эталоном»,— скажем, зарядом электрона. Но пока еще заряд электрона (или число электронов, составляющих кулон) известен с недостаточной точностью, чтобы его можно было принять за единицу в СИ. Заряд электрона определен равным $1{,}60202 \cdot 10^{-19}$ Кл, с точностью до одной стотысячной. Взаимодействием катушек с током ампер определяется менее точно, чем определены эталоны длины, массы и времени; поэтому ведутся изыскания более точного эталона для электрических измерений.

Кельвин (К) — единица термодинамической температуры в СИ. Английский ученый Томсон, получивший за свои научные открытия титул лорда Кельвина, создал термодинамическую шкалу для измерения температуры и установил значение абсолютного нуля температур. В термодинамической шкале Кельвина абсолютный нуль — это нуль кельвинов. Это теоретически наинизшая температура. Если бы ее можно было достичь, то при ней прекратилось бы движение всех атомов и молекул. *Термодинамической* эта шкала называется потому, что измерение температуры проводится на основании термодинамического закона работы идеального теплового двигателя по циклу Карно (см. ст. «Термодинамика»).

В термодинамической температурной шкале точка сосуществования трех фаз воды — льда, воды как жидкости и паров воды (при равновесном давлении 611 Па) — принимается равной 273,16 К. Кельвин определяется как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Термодинамическую температуру практически измеряют гелиевым или водородным термометром, определяя давление газа в замкнутом неизменном объеме, принявшем температуру измеряемого тела.

Практически температуры тел, жидкостей, газов измеряют жидкостными или электрическими термометрами. Наравне с кельвином допускается измерение температур и их разности градусом Цельсия в международной практической шкале. При измерении разности температур градус Цельсия (° С) в точности равен кельвину (К), но в международной практической шкале за 0° С принята температура тающего льда при нормальном атмосферном давлении, а температура кипения воды при том же давлении принята за 100° С. Температура же тающего льда — одновременного существования только двух фаз — воды и льда — по термодинамической шкале равна 273,15 К. Для перехода от кельвинов (T) к градусам Цельсия (t) и наоборот служит формула:

$$T = t + 273{,}15.$$

В жидкостных термометрах изменение температуры определяют по изменению объема жидкости (ртути, спирта), заполняющей шарик термометра при его нагревании или охлаждении. В электрических термометрах (термопарах, термисторах) используется свойство некоторых металлов или сплавов изменять свои электрические характеристики (термоэлектродвижущую силу, сопротивление) в зависимости от температуры.

Для калибровки таких термометров используют кроме тройной точки воды еще несколько опорных точек, температуры которых точно установлены: например, температура кипения водорода 20,28 К; кипения кислорода 90,188 К; затвердевания цинка 692,73 К; затвердевания золота 1337,58 К. Высокую температуру тел (пламени, Солнца, звезд) измеряют на основе законов излучения нагретыми телами света — чем выше температура тела, тем больше энергии излучается светом с более короткими волнами.

Кандела (кд) — единица силы света. Наиболее воспроизводимым и постоянным оказался свет, излучаемый платиной при температуре ее затвердевания 2046 К при нормальном атмосферном давлении. Кандела — сила света, испускаемого с площади, равной 1/600 000 м^2 (1,667 мм^2) площади сечения полного излучателя при температуре затвердевания платины. Полный излучатель (или абсолютно черное тело) изготовлен в виде трубки длиной, примерно в 10 раз большей ее диаметра, которая вставляется в тигель с расплавленной платиной (рис. 6). Тигель и трубка

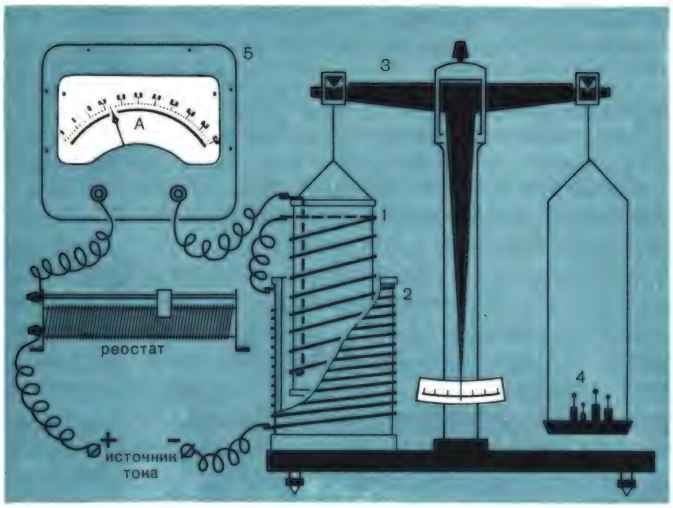


Рис. 5. Токовые весы. По обмоткам двух катушек (*1* и *2*), вставленных друг в друга, течет ток. Катушка (*1*) подвешена к коромыслу весов (*3*). Силу, втягивающую катушку (*1*) в катушку (*2*), уравновешивают весом гирь (*4*). Токовыми весами градуируют амперметр (*5*), которым затем будут измерять силу тока в любых других электрических цепях.

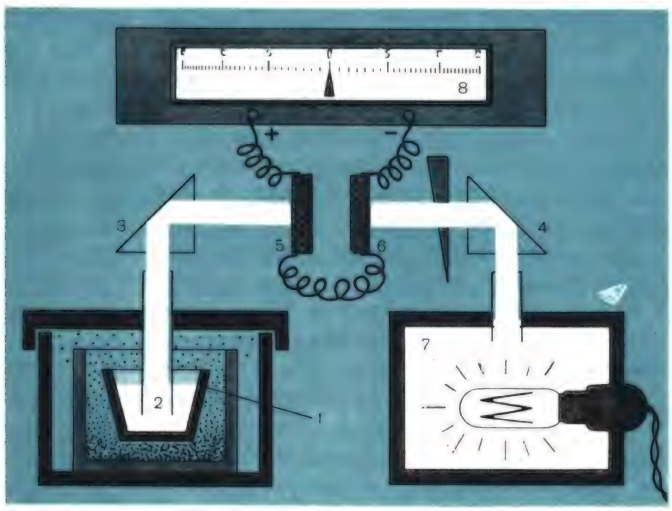


Рис. 6. Схема получения эталона света: *1* — тигель, сделанный из окиси тория; *2* — расплавленная платина; *3* и *4* — отражательные призмы; *5* и *6* — фотоэлементы; *7* — измеряемый источник света; *8* — шкала сравнения.

изготовляются из тугоплавкого вещества — окиси тория. Сила света какого-либо другого источника света, например электрической лампы, сравнивается с эталонным излучением полного излучателя, выводимого из тигеля с расплавленной платиной через трубку, выполняющую роль полного излучателя и световода.

Моль (моль) — единица количества вещества — элемента или химического соединения, имеющая важное применение в химии, физике и физической химии. Моль — количество вещества, содержащего столько же структурных элементов (молекул, атомов, ионов, электронов и других частиц) или групп этих частиц, сколько атомов содержится в нуклиде ^{12}C массой 0,012 кг. Это значит, что в 1 моле, т. е. в 12 г ^{12}C, или в 32 г O_2, или в 44 г CO_2, содержится одно и то же число атомов (или молекул), равное числу Авогадро: $N_A = 6{,}02252 \cdot 10^{23}$.

Для измерения углов предусматриваются две дополнительные единицы — *радиан* и *стерадиан*. Радиан (рад) — для измерения плоских углов. Это угол между двумя радиусами, опирающимися на дугу окружности, равную по длине ее радиусу. Стерадиан (ср) — единица телесного угла — равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную квадрату радиуса.

Из основных и дополнительных единиц СИ образуются производные единицы СИ для измерения площадей, объемов, механических, электрических и других физических величин. Например, единица скорости — *метр в секунду* (м/с), ускорения — *метр на секунду в квадрате* (м/с^2). Единица силы — *ньютон* (Н) — сила, которая массе в 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2. Единица работы и энергии — *джоуль* (Дж) — работа, совершаемая силой 1 Н на пути в 1 м. *Ватт* (Вт) — единица мощности, при которой работа в 1 Дж совершается в 1 с. Единица давления — *паскаль* (Па) — давление, вызываемое силой 1 Н на площадь 1 м^2. *Кулон* (Кл) — количество электричества, проходящее через сечение проводника за 1 с при силе тока 1 А. *Вольт* (В) — единица напряжения, вызывающая в электрической цепи постоянный ток 1 А при мощности 1 Вт. *Люмен* (лм) — единица светового потока, испускаемого точечным источником 1 кд в телесный угол 1 ср. Важнейшие производные единицы приведены в таблице (стр. 520).

Иногда результаты измерений приходится выражать очень большими или очень малыми числами. Они одинаково неудобны для произношения и написания. Для более краткого и удобного выражения конечных результатов измерений предусматривается использование десятичных кратных и дольных приставок: 1000 м — *километр* (км), 1 000 000 Вт — *мегаватт* (МВт), 1 000 000 000 Гц — *гигагерц* (ГГц), 1/1000 м — *миллиметр* (мм), 1/1 000 000 с — *микросекунда* (мкс); *сантиметр* (см) — это 1/100 м, *нанометр* (нм) — 10^{-9} м, *пикофарада* (пФ) — 10^{-12} Ф (см. рис. на стр. 524).

В научной литературе по физике и астрономии допускается использование единиц системы СГС, в которой за основные приняты *грамм, сантиметр, секунда*, а также некоторых специальных единиц (*парсек, световой год* и др.).

Разве единиц не хватает?

Эталоны основных единиц Международной системы определены с максимально возможной для современной науки точностью. СИ принята за основу в большинстве стран мира, в ней имеются единицы любых физических величин. И все же законы ряда стран, в том числе и нашей страны, допускают к применению наравне с единицами СИ и ряд других. Разве в СИ не хватает каких-то единиц?

Дело в том, что ряд единиц и их наименований, не укладывающихся в СИ, но употребляемых людьми в течение столетий, стали настолько привычными и употребительными, что нет ни пользы, ни смысла взять их и отменить. Они привычны и удобны для измерений не только в науке и технике, но и в повседневной жизни. Это *минута* — 60 с, *час* — 60 мин — 3600 с. Пока и не предвидится полный переход системы счисления времени на десятичную. В году не 100 и не 1000 суток, а приблизительно 365,25. Таково же положение с единицами плоских углов: градус ($1° = 0{,}01745329$ рад), угловая минута — $1/60°$, угловая секунда — $1/60'$. Для измерений массы допускаются метрические же, только по наименованию не соответствующие СИ единицы: *тонна* (т), равная 1000 кг, и *центнер* (ц), равный 100 кг; для измерений площади — *гектар* (га), равный 10^4 м^2; для измерений объема — *литр* (л), равный одной тысячной кубического метра (10^{-3} м^3). По вековой морской традиции скорость кораблей измеряют в узлах. *Узел* — это 1,852 км/ч — одна морская миля в час. Язык не повернется у моряка сказать, что скорость корабля 36 км/ч или 10 м/с. Он скажет: 20 узлов. Расстояние в навигации измеряют в *морских милях* (м. миля), 1 м. миля равна 1852 м (точно). 1 м. миля примерно равна длине одной минуты дуги земного меридиана.

На странице 523 помещена таблица важнейших физических констант, которые часто встречаются в формулах и расчетах.

А что такое верста?

До введения метрической и тем более Международной системы единиц в различных странах существовали свои, национальные единицы и системы измерений, ныне вышедшие из употребления и представляющие интерес, казалось бы, только для историков. Некоторыми из них люди пользовались тысячелетия тому назад, другими — в недалеком прошлом, всего 50—100 лет назад. Но все же знать о них и необходимо и интересно, они часто встречаются в литературе — русской, европейской, американской. Вспомните хотя бы «20 000 лье под водой» Жюля Верна, «451° по Фаренгейту» Рея Брэдбери. Произведения литературы не учебники, в них не заменишь национальные единицы на международные! Встречаясь в произведениях литературы с прежними единицами, хочется сравнить их с привычными нам. Верста, туаз, фунт — сколько это метров или килограммов?

Вот какими были, например, старые российские меры: в версте было 500 саженей, в сажени — три аршина, в аршине — 16 вершков. 1 *вершок* равен 4,445 см. Четыре вершка составляли *пядь* — 17,78 см. *Аршин* был равен 71,12 см, *сажень* — 2,133 м, *верста* — 1,066 км. В 1709 г. Петр I постановил, чтобы в аршине было 28 английских дюймов. С тех пор русские меры длины стали соизмеримыми с английскими. 1 *дюйм* — это 2,54 см. В России было введено еще десятичное деление дюйма: в дюйме 10 линий по 2,54 мм, в линии 10 точек по 0,254 мм. Основной мерой площади земли была *десятина* — 1,09 га. Наиболее часто встречающиеся меры объема — *ведро* — 12,3 л, *штоф* — 1,23 л. Русская мера массы — *фунт* — равна 409 г. В фунте было 32 лота, в лоте — 3 золотника, 40 фунтов составляли *пуд* — 16,4 кг. Мерой массы алмазов, драгоценных камней, жемчуга до сих пор служит *карат*, равный 0,2 г (точно).

До недавнего времени в мире была широко распространена британская система мер. Единица длины в ней — *ярд* (0,914 м). *Фут* (в переводе с английского — «ступня ноги») равен 30,49 см. Размеры спортивных полей, ворот для футбола, хоккея, баскетбола были установлены в ярдах и футах и таковы до сих пор. В футе 12 *дюймов* по 2,54 см. *Британский фунт* (0,453 кг) содержит 16 *унций* по 28,35 кг. *Британская тонна* равна 2240 фунтам (1016 кг). Британские единицы были установлены еще в средние века, и только в 1965 г. английский парламент принял решение принять в королевстве Международную систему; только с 1969 г. Великобритания перешла на десятичное счисление в денежной системе.

Своеобразна применявшаяся в Англии и США температурная шкала Фаренгейта, появившаяся еще в 1715 г. Фаренгейт — один из первых изобретателей знакомого нам жидкостного термометра. За нуль градусов своей шкалы он принял температуру смеси льда с нашатырем (хлористым аммонием), полагая,

что это наинизшая температура на Земле. За вторую точку шкалы Фаренгейт принял температуру тела здорового человека, приписав ей значение 96° F. Перевести температуру из градусов Фаренгейта t_F в градусы Цельсия t_C можно по формуле: $t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32)$. 0° C соответствует 32° F, температура кипения воды (100° C) соответствует 212° F. Восьмидесятиградусный мороз в рассказах Джека Лондона — это —62° C. С таким морозом шутки плохи.

Редко, но встречается шкала Реомюра, перевести ее в шкалу Цельсия просто — надо число градусов Реомюра умножить на 1,25. В шкале Реомюра температура тающего льда 0° R, температура кипящей воды 80° R.

Старинная французская мера длины — *туаз*, равная 1,97 м, близка к русской сажени. *Лье* — единица измерения больших расстояний — равна примерно 4,5 км, на ровной местности это соответствует расстоянию до видимой линии горизонта.

В этой статье мы рассказали о единицах и системах единиц, подробнее о современных и коротко о старых. С развитием науки людям приходится изучать и измерять величины, характерные для вновь открываемых физических явлений, и придумывать для этого новые единицы. Пришлось придумать, как измерять количество информации, которую вы получили, прочитав, например, эту статью; количество информации измеряется в *битах*.

А ученым приходится измерять, казалось бы, совсем неизмеримые величины — интенсивность запаха, силу землетрясений, штормов, даже успеваемость учеников. Пока все это, в том числе и успеваемость учеников, не измеряют точно, а оценивают баллами. Придет время, и люди научатся, вероятно, точно измерять, скажем, успеваемость в единицах запомнившейся учеником информации — в мегабитах.

Приходится пока измерять и силу взрыва ядерных бомб — в килотоннах и мегатоннах взрывчатки. Вот какие «единицы» следовало бы как можно скорее вытеснить из обращения и памяти людей!

Развитие систем и единиц измерений неотделимо от развития науки и техники, требующего повысить точность измерений и точность эталонов единиц. Точные измерения — одно из основных средств науки в открытии неведомых еще тайн и законов природы. Лишний достоверный десятичный знак в определениях единиц и результатах измерений может раскрыть перед людьми новые области знаний, свойства вещества, законы природы.

Таблица

Важнейшие основные, дополнительные и производные единицы СИ

Наименование физической величины	Единицы СИ		Внесистемные единицы			
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Значение в единицах СИ	Пояснение
Длина	метр	м				
			морская миля	м. миля	1852 м (точно)	Примерно равна 1 минуте земного меридиана
			ангстрем	Å	10^{-10} м	Шведский физик Андерс Ангстрем
			сантиметр	см	10^{-2} м	
Масса	килограмм	кг				
			грамм	г	10^{-3} кг	
			центнер	ц	100 кг	
			тонна	т	1000 кг	
Время	секунда	с				
			минута	мин	60 с	
			час	ч	3600 с	
			сутки	сут	86 400 с	
Сила электрического тока	ампер	А				Французский физик Андре Ампер
			единица СГС		$3{,}33564 \cdot 10^{-10}$ А	

Наименование физической величины	Единицы СИ		Внесистемные единицы			
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Значение в единицах СИ	Пояснение
Температура (термодинамическая Кельвина)	кельвин	К				Английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин) Шведский физик и астроном Андерс Цельсий
			градус Цельсия	°С	1 К (точно) (для разности температур)	
Сила света	кандела	кд				Латин. «свеча»
Количество вещества	моль	моль				
Плоский угол	радиан	рад				
			градус	. . .°	$1{,}745329 \cdot 10^{-2}$ рад	
			минута	. . .′	$2{,}908882 \cdot 10^{-4}$ рад	
			секунда	. . .″	$4{,}848137 \cdot 10^{-6}$ рад	
Телесный угол	стерадиан	ср				
Площадь	квадратный метр	$м^2$				
			гектар	га	10^4 $м^2$	
Объем	кубический метр	$м^3$				
			литр	л	10^{-3} $м^3$	
Скорость	метр в секунду	м/с				
			узел	уз.	1 узел = 1 м. миля в час = 0,514 м/с	Морской термин
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$				
Частота	герц	Гц				Немецкий физик Генрих Герц
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$				
			грамм на кубический сантиметр	$г/см^3$	10^3 $кг/м^3$	
Сила	ньютон	Н				Английский физик Исаак Ньютон
			килограмм-сила	кгс	9,80665 Н (точно)	
			дина	дин	10^{-5} Н	Латин. «сила»
Давление	паскаль (ньютон на квадратный метр)	Па				Французский физик Блез Паскаль
			атмосфера (килограмм-сила на квадратный сантиметр)	$кгс/см^2$	98 066,5 Па (точно)	Примерно равна атмосферному давлению
			миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,322 Па	
			миллиметр водного столба	мм вод. ст.	9,80665 Па (точно)	

Наименование физической величины	Единицы СИ		Внесистемные единицы			
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Значение в единицах СИ	Пояснение
Работа, энергия	джоуль (работа силы 1 Н на пути 1 м)	Дж				Английский ученый Джеймс Джоуль
			ватт-час	Вт·ч	3600 Дж	
			калория	кал	4,1868 Дж (точно)	
			эрг	эрг	10^{-7} Дж	
			электронвольт	эВ	$1{,}60210 \cdot 10^{-19}$ Дж	Энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов
Мощность	ватт	Вт				Английский изобретатель Джеймс Уатт
			лошадиная сила	л. с.	735,499 Вт	
Количество электричества; электрический заряд	кулон	Кл				Французский физик Шарль Кулон
			ампер-час	А·ч	3600 Кл	
			единица СГС		$3{,}33564 \cdot 10^{-10}$ Кл	
Электрическое напряжение; разность потенциалов	вольт	В				Итальянский физик Алессандро Вольта
			единица СГС		299,7925 В	
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м				
			единица СГС		$2{,}997925 \cdot 10^{4}$ В/м	
Электрическая емкость	фарада	Ф				Английский ученый Майкл Фарадей
			единица СГС		$1{,}11265 \cdot 10^{-12}$ Ф	
Электрическое сопротивление	ом	Ом				Немецкий физик Георг Ом
			единица СГС		$0{,}898755 \cdot 10^{12}$ Ом	
Магнитный поток	вебер	Вб	единица СГС		10^{-8} Вб	Немецкий физик Вильгельм Вебер
Магнитная индукция	тесла	Т				Югославский изобретатель Никола Тесла
			гаусс	Гс	10^{-4} Т	Немецкий математик Карл Гаусс
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м				
			эрстед	Э	79,5775 А/м	Датский физик Ханс Эрстед
Индуктивность	генри	Г				Американский физик Джозеф Генри

Наименование физической величины	Единицы СИ		Внесистемные единицы			
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Значение в единицах СИ	Пояснение
Световой поток	люмен	лм				Латин. «свет»
Освещенность	люкс	лк				Латин. «свет»
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м^2				

Таблица важнейших физических констант (на 1970 г.)

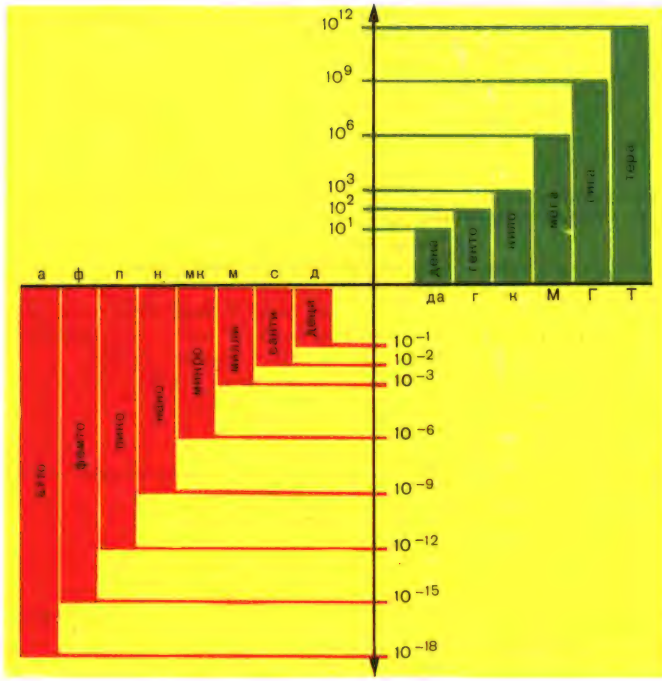
Величина	Обозначение	Значение в единицах СИ
Скорость света	c	$(2{,}997925 \pm 0{,}000001)10^8$ м/с
Заряд электрона	e	$(1{,}6021917 \pm 0{,}0000070)10^{-19}$ Кл
Постоянная Планка	h	$(6{,}626196 \pm 0{,}000050)10^{-34}$ Дж·с
Число Авогадро	N_A	$(6{,}02252 \pm 0{,}00028)10^{23}$ моль$^{-1}$
Атомная единица массы	а.е.м.	$(1{,}660531 \pm 0{,}000011)10^{-27}$ кг
Масса электрона	m_e	$(9{,}109558 \pm 0{,}000054)10^{-31}$ кг
Масса протона	m_p	$(1{,}672614 \pm 0{,}000011)10^{-27}$ кг
Масса нейтрона	m_n	$(1{,}674920 \pm 0{,}000011)10^{-27}$ кг
Гравитационная постоянная	G	$(6{,}673 \pm 0{,}003)10^{-11}$ Н·м^2/кг^2
Постоянная Больцмана	k	$(1{,}38054 \pm 0{,}00018)10^{-23}$ Дж/К
Универсальная газовая постоянная	R_0	$(8{,}31434 \pm 0{,}00035)$ Дж/моль·К

Разберемся в размерах

В этом томе и в других томах Детской энциклопедии вы не раз читали о бесконечно большом и бесконечно малом: о крошечных амебах и громадных молекулах белка, о малых планетах, гигантских растениях, о невообразимо больших космических просторах, невообразимо маленьких электронах. Как представить, как сопоставить и навести порядок во всем этом?

Расставим по ранжиру все, что есть во Вселенной. Вот серия рисунков. На исходном — нулевом рисунке — глаз человека. Он и будет нашей отправной точкой для обзора всего остального. Глаз изображен в натуральную величину, т. е. в масштабе 1 : 1. А на рисунке 1 масштаб уже 1 : 10 (масштаб уменьшен в десять раз). В клеточку входят предметы в десять раз большие, чем глаз. На рисунке 2 масштаб 1 : 100. Сторона клеточки 3 м, в нее целиком входит даже самый высокий человек. Масштаб третьего рисунка 1 : 1000. В квадрате хватило места для дома и дерева средних размеров, но это еще не гигант растительного мира. На рисунке 4 (масштаб 1 : 10 000) жилой дом превратился в коробочку. Здесь поместятся египетская пирамида или Эйфелева башня. Впрочем, Останкинская телевизионная башня, самое высокое сооружение, вышла бы за обрез. Но квадрат 5 (масштаб 1 : 100 000) чересчур просторен для строений. Даже Крымские горы — горы средней высоты — заполняют его только до половины.

Джомолунгма — высочайшая вершина мира — изображена на рисунке 6. Тут же появилась и скромная малая



Кратные и дольные приставки и их наименования.

планета — астероид Эрот. Весь рисунок 7 занимает полуостров Крым. Оказывается, в «ширину» он на два порядка больше, чем в «высоту». На рисунке 8 кроме Крыма поместились Черное и Каспийское моря, Кавказ, Турция и Украина. А на рисунке 9 хватило места для всего земного шара. Следовательно, размеры нашей планеты на 9 порядков больше размеров глаза и на 7 порядков больше размеров человека.

Принцип построения таблицы ясен: от рисунка к рисунку масштаб уменьшается в десять раз, в поле зрения попадают предметы в десять раз крупнее — на один порядок больше. Отсчитывая клетки, можно сравнивать их. Например, клетка 5 на три порядка больше клетки 2. Три порядка — это тысяча. Горы примерно в тысячу раз выше человека. Номер клетки соответствует масштабу. Масштаб девятой клетки — 1 : 1 000 000 000. В знаменателе единица с девятью нулями. Можно написать это число и так: 10^{-9}. Масштаб двадцатой клетки 10^{-20}, т. е. двадцать нулей после единицы в знаменателе. Просто!

Итак, в девятой клетке целиком вся Земля. Все последующие клетки отведены астрономии. В клетке 10 оказался Сатурн, в клетке 11 — Солнце. Значит, он на два порядка (точнее, в 109 раз) больше Земли по диаметру. На рисунках 12, 13, 14 размещены звезды-гиганты, а с рисунка 15 пошли системы небесных тел, прежде всего планетная система — семья Солнца. Далее двойные и кратные звезды, газовые туманности, скопления звезд, рассеянные, шаровые и, наконец, наша Галактика — сначала только ее ядро (рис. 21), а затем и вся она полностью (рис. 23). На рисунке 24 — так называемая Местная система галактик. Тут и Млечный путь, и Магеллановы облака, и туманность Андромеды — соседняя спиральная галактика. Скопления галактик все более и более обильные (рис. 25, 26, 27). Все, что доступно рекордно мощным телескопам и радиотелескопам, весь видимый мир умещается на рисунке 28, масштаб которого 1 : 10^{28}.

А что надо изобразить на рисунке 29, наука пока не знает.

Вернемся к нашему исходному пункту — к глазу человека — и проделаем наше путешествие в противоположном направлении: углубимся в мир малых величин. На этот раз от рисунка к рисунку мы будем увеличивать масштаб тоже в десять раз. На рисунке минус первом у нас оказалось насекомое, рекордсмен прыгунов микровеса,— блоха обыкновенная. Она в десятки раз меньше глаза. Для рисунка —2 (масштаб 100 : 1, т. е. стократное увеличение) не нашлось предмета, различимого без микроскопа. Здесь помещена амеба среднего размера. Даже волос был бы чересчур толст для рисунка —2.

Между рисунками —1 и —2 проходит трудный барьер, который человечество не могло переступить вплоть до XVII в. Все наши предки видели рачков, жучков и блох; амебу до Левенгука не видел никто. Только микроскоп позволил перешагнуть через естественные пределы человеческого зрения, показать людям мир одноклеточных животных и отдельных клеток. Клетки — кровяные шарики — изображены на рисунке —3, на рисунке —4 — бактерии. И снова барьер — барьер дифракции. Нельзя с помощью света видеть то, что меньше длины световой волны. Только перейдя от видимых лучей к невидимым, от световых волн к электронным, уже в середине XX в. наука продвинулась еще на две ступени: получила фотографии вирусов, изображенных на рисунке —5, а вслед за тем и изображения молекул, но далеко не такие подробные, как на рисунке —6 (увеличение в миллион раз — в 10^6). Молекулы оказались и на рисунке —7. Около минус седьмой клетки проходит граница сегодняшнего технического видения. Дальнейшие рисунки составлены на основании косвенных данных, добыты опытами и расчетами, «увидены» с помощью приборов, которые не фотографируют, а только измеряют свойства: электрические, магнитные, скорость, силу удара, плотность и т. д.

На рисунке —8 условно изображен атом: в центре — положительно заряженное ядро, на периферии — орбиты отрицательно заряженных электронов. Рисунок этот условный: физики не считают, что электроны действительно движутся по таким орбитам. Да и размеры ядра преувеличены. В таком масштабе ему полагалось бы быть невидимой микроскопической точкой.

Для рисунков —9, —10, —11 не нашлось характерных объектов. На каждом из них атомное ядро пришлось бы изобразить точкой. Но на рисунке —12 можно разглядеть, что ядро состоит из тесной группы элементарных частиц — нуклонов. Одна из частиц — электрон — занимает всю клетку —13. Изображен он туманным кружком, ибо строение электрона неведомо. Вообще долго шли споры, есть ли у электрона какая-нибудь структура. Да и размеры его не очень определенны.

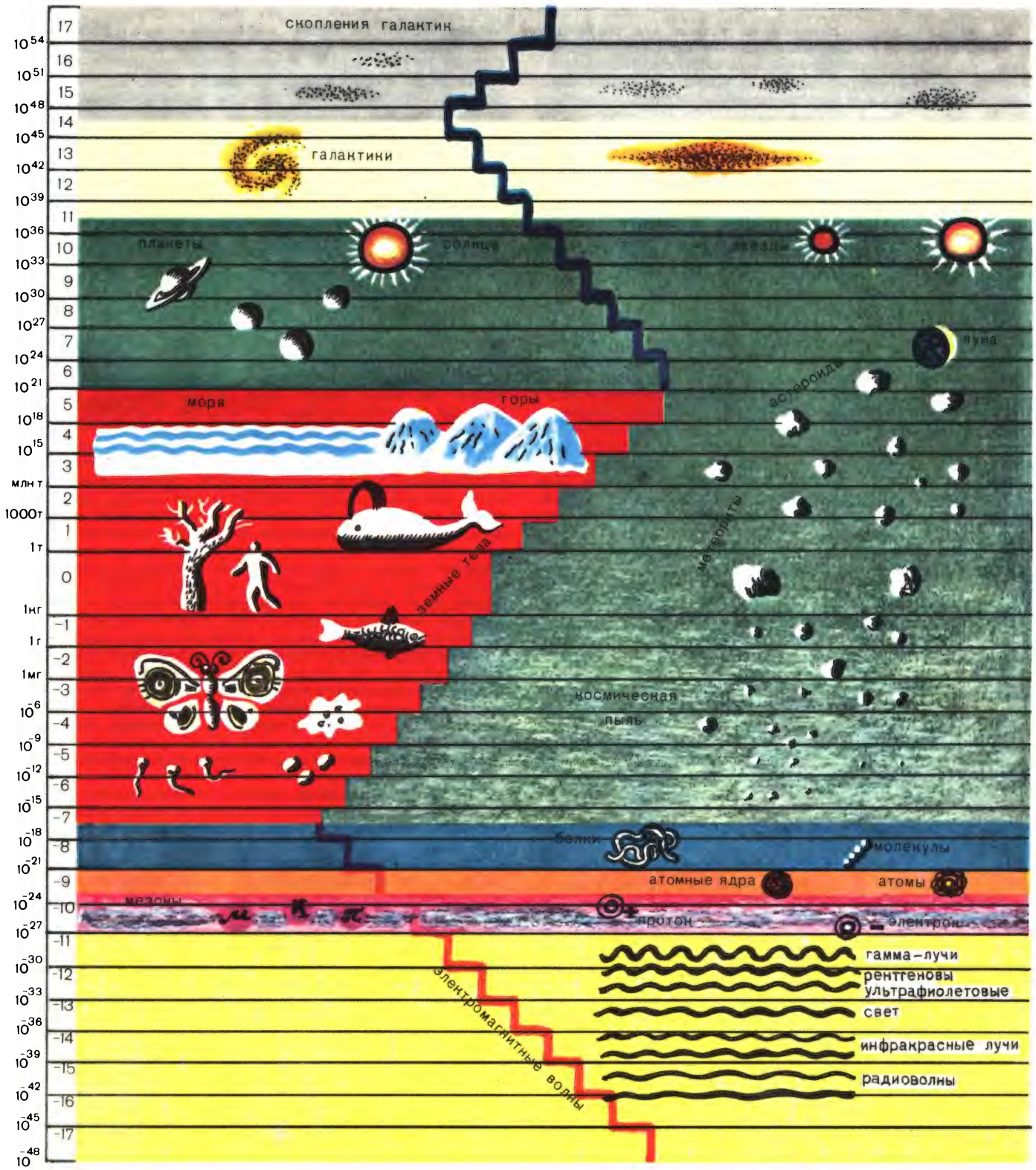
И уж совсем гадательна клетка —22, где помещено нейтрино — самая загадочная из частиц. Помещается здесь не сама частица, а ее эффективное сечение, т. е. пространство, в котором эта удивительная частица взаимодействует с другими.

Электрон на 13 порядков меньше глаза, примерно на 15 порядков меньше человека. Проникновение в мир малых величин оказалось для науки труднее, чем путешествие в мир гигантов. В астрономии 26 порядков, считая от человека вверх (рис. на стр. 526).

Говорилось уже, что рисунки наглядно демонстрируют размерные соотношения предметов. Теперь вы и сами можете подсчитать, что вирусы на три порядка (или в тысячу раз) больше атомов, а те, в свою очередь, в сто тысяч раз больше электронов, что вирусы раз в десять больше гигантских белковых молекул, а скромные малые планеты больше гигантов растительного мира в сотни раз. Вот и появились порядок и ясность в невообразимом.

0 1:1 3см
1 1:10 30см
2 1:100 3м
3 1:1000 30м
4 1:10тыс 300м
5 1:100тыс. 3км
6 1:1млн. 30км
7 1:10млн. 300км
8 1:100млн. 3тыс.км
9 1:10⁹ 30тыс.км
10 1:10¹⁰ 300тыс.км
11 1:10¹¹ 3млн.км
12 1:10¹² 30млн.км
13 1:10¹³ 300млн.км
14 1:10¹⁴ 3млрд.км
15 1:10¹⁵ 200астр.ед.
16 1:10¹⁶ 2тыс.астр.ед.
17 1:10¹⁷ 20тыс.астр.ед.
18 1:10¹⁸ 3св.года
19 1:10¹⁹ 30св.лет
20 1:10²⁰ 300св.лет
21 1:10²¹ 3тыс.св.лет
22 1:10²² 30тыс.св.лет
23 1:10²³ 300тыс.св.лет
24 1:10²⁴ 3млн.св.лет
25 1:10²⁵ 30млн.св.лет
26 1:10²⁶ 300млн.св.лет
27 1:10²⁷ 3млрд.св.лет
28 1:10²⁸ 30млрд.св.лет
29 1:10²⁹ 300млрд.св.лет

0 1:1
3см
-1 увеличено в 10 раз
3мм
-2 в 100 раз
300мкм
-3 в 1000 раз
30мкм
-4 в 10тыс.раз
3мкм
-5 в 100тыс.раз
3тыс.Å
-6 в 1млн.раз
300Å
-7 в10млн.раз
30Å
-8 в 100млн.раз
3 Å
-9 в 1млрд.раз
3 10^{-9}см
-10 в 10^{10}раз
3 $\cdot 10^{-10}$см
-11 в 10^{11}раз
3 $\cdot 10^{-11}$см
-12 в 10^{12}раз
3 $\cdot 10^{-12}$см
-13 в 10^{13}раз
3 $\cdot 10^{-13}$см
-14 в 10^{14}раз
3 $\cdot 10^{-14}$см
-15 в 10^{15}раз
3 $\cdot 10^{-15}$см
-16
-17
-18
-19
-20 в 10^{20}раз
3 10^{-20}см
-21
-22
нейтрино?
-23
-24
-25 в 10^{25}раз
3 $\cdot 10^{-25}$см
-26
-27
-28
-29 в 10^{29}раз
3 10^{-29}см


скопления галактик
галактики
планеты
солнце
звезды
луна
астероиды
моря
горы
земные тела
метеориты
космическая пыль
белки
молекулы
атомные ядра
атомы
мезоны
протон
электрон
гамма-лучи
рентгеновы
ультрафиолетовые
свет
инфракрасные лучи
радиоволны
электромагнитные волны
млн т
1000т
1т
1кг
1г
1мг

Но ряды рисунков полезны не только для сравнения размеров. Они дают представление о природе в целом, дают пищу для размышлений о ее общих свойствах.

Вероятно, вы и сами заметили, что от рисунка к рисунку меняется не только масштаб, но и тема — предмет изображения. Люди бывают разного роста, но и самый рослый великан выглядел бы жалкой черточкой на рисунке 3, а в рисунок 1 не удалось бы втиснуть даже младенца. Мы все время должны были подбирать что-то новое. Можно было на рисунке 3 нарисовать кита или динозавра, но ни одного животного достаточно крупного не нашлось бы, чтобы поставить его на рисунок 4 рядом с Эйфелевой башней. А для рисунка 5 не нашлось и подходящего здания. Оказывается, у каждого класса предметов есть свои характерные размеры — от и до. Для людей квадратик 2, для зверей 1, 2 и 3, для зданий 3 и 4, для гор 5 и 6.

Особенно резко заметны границы, когда мы располагаем предметы не по размерам, а по массе, как это сделано на таблице (стр. 527). Так как масса связана с объемом, а объем пропорционален кубу линейного размера, здесь каждой ступени отвечает увеличение не в 10, а в 1000 раз. Человеку мы отвели центральную ступень, исходную для отсчета, назвали ее нулевой. Здесь предметы с массой от 1 до 1000 кг. И что же получается: для звезд — две ступеньки, для молекул — две, для атомов — одна, для живых существ — девять ступеней. Но у каждого типа, класса, отряда свое место: звери — на трех ступеньках, птицы — на двух, бактерии — на двух и т.д.

В общем-то таблица масс сходна с таблицей линейных размеров. Впрочем, есть и различия. Например, Солнце по размеру отстоит от Солнечной системы на четыре порядка. На таблице же масс они сливаются, потому что в Солнце находится почти вся масса системы — 99,8%. То же и в мире атомов: в ряду размеров атом и атомное ядро разделены четырьмя порядками, а на таблице масс они неразличимы, так как 99,9% массы сосредоточено в ядре.

Атомное ядро и звезда (Солнце — одна из звезд) как бы переломные уровни природы. Переломы были бы всего заметнее, если бы мы прибавили еще одну таблицу — график плотностей. Тогда все предметы мира легли бы на три обрывистых уступа. Большая часть известных нам предметов и существ оказалась бы на среднем уступе — возле единицы, близ плотности воды. Тут собрались бы и животные, и растения (обычная плотность — 0,9—1,1), и почти все минералы с плотностью от 2 до 5, химические элементы вплоть до самых тяжеловесных (золото —19,3, осмий — 22,5), а также небесные тела: астероиды, планеты и подавляющая часть звезд (Солнце — 1,4).

Над этим миром обычной плотности оказался бы переход к космической сверхразреженности. Что там разреженность воздуха, что там лабораторный вакуум! Плотность в звездных скоплениях — примерно 10^{-20} — 10^{-22}, а в нашей Галактике — около 10^{-23}, т. е., если размазать все звезды по этому гигантскому блину, плотность его окажется 10^{-23}, в 100 000 000 000 000 000 000 000 раз меньше, чем у воды. Плотность же всей Метагалактики еще меньше, вероятно 10^{-29} — 10^{-30}. Один муравей на земном шаре — вот что такое плотность 10^{-30}.

С другой стороны, в глубинах атома мы встретили бы скачок к сверхудивительной сверхплотности: примерно 10^{11} — у электронов, 10^{14} — у атомных ядер, 10^{15} — у гиперонов. Плотность золота удивляла наших предков. Она в 19 раз больше, чем плотность воды. А у атомного ядра плотность — 100 тыс. млрд. Одна капелька ядерного вещества весила бы сотню тысяч тонн, как крупнейший океанский танкер. Нефтевоз в капельке, набранной пипеткой!

Итак, три типа плотностей знает природа: космическую сверхразреженную, обыкновенную атомно-звездную и сверхплотную внутриядерную. И грани между этими плотностями проходят резким обрывом между Солнечной системой и Солнцем, между атомом и атомным ядром.

Рассматривая рисунки, вы запомнили, конечно, что ряд великанов гораздо длиннее ряда карликов. На таблице масс такой диспропорции нет: тут человек оказался почти точно в середине — 17 ступеней вверх, 17 ступеней вниз.

Произошло это за счет нижней части таблицы масс, где несколько ступеней занимают электромагнитные волны.

Окинем еще раз взглядом всю таблицу масс. Итак, на одной ступени — звезды, на другой — планеты. Свои ступени у молекул, свои — у атомов. У каждой группы предметов собственные «квартиры», излюбленные «этажи». И, соответственно, по разным этажам распределяются науки. На самом верху, «под небом», работает астрономия, на средних ступенях — геология, биология, технические науки. Всего пять ступеней — две вверх от человека и две вниз — покорила техника.

Нижнюю часть таблицы, основу основ, изучают физика и химия. Причем владения химии начинаются не снизу, а только на минус девятой ступени, где из атомов образуются сложные сооружения — молекулы. Но так как все вещества и все существа состоят из молекул, так как химические процессы идут и в неживой и в живой природе, химия простирает свое влияние на много ступеней вверх: через биохимию — на все живое, через геохимию — на неживое. Но на десятой ступени — в мире горячих солнц — молекулы опять делятся на атомы. Там и приходит конец влиянию могущественной химии.

Сфера влияния физики еще обширнее. Фундамент мира, кирпичики, из которых построено всё — атомы и элементарные частицы, находится в ведении физики. С миром жизни физика связана через биофизику, с земными телами — через геофизику, с небесными телами — через астрофизику. С физикой мы не расстаемся ни на нижней семнадцатой, ни на верхней семнадцатой ступенях.

Естественно возникает вопрос: завершена ли лестница масс? Что мы встретим на восемнадцатой, девятнадцатой и прочих ступенях, будет ли счет ступеней продолжаться до бесконечности?

Ученые неоднозначно отвечают на этот вопрос. Большинство астрономов, ведающих верхней частью таблицы, думают, что лестница будет продолжаться вверх бесконечно. Хотя напоминают, что вскоре мы подойдем к рубежам, откуда свет до нас не доходит. И телескоп исчерпает себя, как исчерпал в свое время свои возможности микроскоп.

Физики, хозяева нижних ступеней, чаще полагают, что тут далеко вниз не продвинешься. Идут споры. Может, и вы, став взрослыми, примете в них участие.

Что читать

Дорогие ребята! В этом томе вы познакомились с ролью физики и химии в жизни людей. Вы прочитали об основных физических явлениях, их применении в технике, о строении вещества и его превращениях, о свойствах химических элементов и их соединений. Если вы захотите углубить ваши знания, то прочитайте еще и другие книги, просмотрите также и научно-популярные журналы. В этом вам поможет библиографический указатель «Что читать».

Список литературы составлен соответственно разделам тома. Внутри раздела книги расположены по алфавиту. О каждой книге даны следующие сведения: фамилия и инициалы автора; заглавие; выходные данные (место издания, название издательства и год выпуска), количество страниц, иллюстрации, а иногда и серия, в которой выпущена книга.

В указателе перечислены также альманахи и журналы, в которых регулярно печатаются статьи и заметки, посвященные проблемам физики и химии.

Движение и энергия

Анфилов Г. Бегство от удивлений. М., «Детская литература», 1967. 288 с. с ил.

Книга для юных любителей физики с философским складом ума. Почему падает камень? Почему светят звезды? Почему ночью темно? В этой книге поясняется, что такое движение, тяготение, причинность, относительность, пространство, время и Вселенная.

Блудов М. И. Беседы по физике. Ч. 1—3. М., «Просвещение», 1964—1970. Ч. 1, 1964. 166 с. с ил.; ч. 2, 1965. 163 с. с ил.; ч. 3, 1970. 256 с. с ил. (Б-ка школьника).

Эта книга поможет разобраться в наиболее трудных вопросах курса физики.

Бонди Г. Относительность и здравый смысл. Пер. с англ. М., «Мир», 1967. 164 с.

Популярное изложение основ теории относительности.

Брэгг У. Т. Мир света. Мир звука. Пер. с англ. М., «Наука», 1967. 335 с. с ил.

Природа света, глаз и зрение, свет от Солнца и звезд, цвет и его возникновение, рентгеновские лучи — таково содержание первой части книги. Во второй части рассказано о том, что такое звук, и о звуках в окружающем нас мире.

Васильев М. В., Станюкович К. П. Сила, что движет мирами (о материи живой и спящей). М., Атомиздат, 1969. 192 с.

Книга рассказывает о природе тяготения и связи гравитации с теорией элементарных частиц.

Гельфер Я. М. Что такое теплота (элементарное введение в теорию теплоты и теплопередачи). Изд. 2, перераб. М., «Энергия», 1968. 128 с.

Гильзин К. Новеллы о мире иных констант. М., «Детская литература», 1966. 255 с.

Автор рассказывает о силах и законах, действующих во Вселенной.

Глюк И. И. Все это делают зеркала. Пер. с англ. М., «Мир», 1970. 192 с.

Книга знакомит с «тайнами» зеркал — с оптикой зеркал и ее удивительными особенностями, с разнообразными применениями зеркал в жизни, в точнейших приборах, телескопах, микроскопах, солнечных нагревателях, лазерах и на космических кораблях. Описаны разнообразные опыты и фокусы, которые легко можно сделать и показать самому.

Григорьев В. И., Мякишев Г. Я. Силы в природе. Изд. 3, испр. и доп. М., «Наука», 1969. 416 с.

Рассказ об основных силах, действующих в природе (гравитационных, электромагнитных, ядерных, слабых взаимодействиях).

Гуревич В. З. Теплый свет. М., «Наука», 1966. 119 с. (Научно-популярная серия).

Популярная книга об инфракрасном излучении, его свойствах и применении.

Зигель Ф. Ю. Занимательная космонавтика. М., «Машиностроение», 1970. 304 с.

Сборник коротких рассказов о космонавтике, механике космических полетов, физических явлениях, сопровождающих эти полеты.

Из школы во Вселенную. М., «Молодая гвардия», 1970. 176 с.

Сборник статей советских ученых о важнейших проблемах физики и химии. В конце книги читатель найдет рассказы о Ньютоне, Ампере, Винере, Лебедеве и Боре, а также «Практикум для смекалистых», в котором помещены занимательные вопросы и задачи по физике и химии. Небольшие заметки и забавные истории сообщают интересные факты из различных областей физики и химии.

Карцев В. П. Магнит за три тысячелетия. М., Атомиздат, 1968. 160 с. с ил.

Карцев В. П. Трактат о притяжении, или История Геркулесова камня магнита от Синдбада-Морехода до термоядерных электростанций, содержащая любопытные факты, разъяснения, рассуждения и многочисленные иллюстрации. М., «Советская Россия», 1968. 192 с. с ил.

Карцев В. П. Приключения великих уравнений, или собрание рассказов и других занимательных историй, касающихся многих вещей — громов, молний, рыб, чудаков, каравелл, спутников — словом, всего того что имеет отношение к уравнениям Максвелла. М., «Знание», 1970. 320 с. с портр. и ил.

Келер В. Возвращение чародея. М., «Детская литература», 1970. 208 с. с ил.

Книга посвящена широкому кругу вопросов классической и современной физики. В ней рассказано о законах механического движения, об энергии и ее источниках, о четырех состояниях вещества, законах микромира и нерешенных проблемах физики.

Кемпфер Ф. Путь в современную физику. Пер. с англ. М., «Мир», 1972. 375 с.

Киренский Л. В. Магнетизм. Изд. 2, перераб. и доп. М., «Наука», 1967. 196 с.

Современные представления о магнитных свойствах вещества, использование их в технике, роль магнитных явлений в изучении строения материи.

Кок У. Звуковые и световые волны. Пер. с англ. М., «Мир», 1966. 160 с. (В мире науки и техники).

Рассказ о волновом движении, излучении и распространении волн, о природе звука и света, работе различных акустических и оптических приборов.

Кудрявцев П. С. История физики. От открытия квант до создания квантовой механики. М., «Просвещение», 1971. 422 с. с ил.

Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Физика для всех. Движение. Теплота. Изд. 2. М., «Наука», 1965. 391 с. с ил.

Не повторяя школьного курса, книга помогает углубить и расширить понимание физических законов.

Ландау Л. Д., Румер Ю. Б. Что такое теория относительности. Изд. 2. М., «Советская Россия», 1963. 75 с.

Линднер Г. Физика в космосе. Пер. с нем. М., «Мир», 1966. 248 с. с ил.

Автор излагает физические закономерности, которые господствуют в космосе, и знакомит с другими вопросами физики применительно к космонавтике, в том числе с основами механики Ньютона и теорией относительности.

Маковецкий П. В. Смотри в корень! Сборник любопытных задач и вопросов. Изд. 2. М., «Наука», 1969. 365 с.

Задачи из области механики, акустики и оптики, в большинстве своем парадоксальные, решение которых, казалось бы, противоречит здравому смыслу.

Меркулов А. За пределами зримого. М., «Машиностроение», 1971. 224 с.

Популярные очерки об оптике, электронике и «внутривидении» — интроскопии.

Миннарт М. Свет и цвет в природе. Пер. с англ. Изд. 2. «Наука», 1969. 344 с.

Книга известного голландского астронома профессора Миннарта не учебник и не популярное изложение давно известных истин. Это поэтический рассказ о больших и малых секретах природы, в которые может проникнуть внимательный наблюдатель, не имеющий каких-либо приборов и не обладающий специальными знаниями.

Мовчан Ю. И. Физика и путь в космос. М., «Высшая школа», 1971. 120 с.

Орир Л. Популярная физика. Пер. с англ. М., «Мир», 1969. 556 с. с ил.

Книга об основных законах физики и последних достижениях физической науки.

Перельман Я. И. Занимательная физика. Кн. 1—2. Изд. 18. М., «Наука», 1971. Кн. 1 — 216 с.; кн. 2 — 263 с.

Перельман Я. И. Занимательная механика. Изд. 2. М., Физматгиз, 1959. 187 с. с ил.

Книги известного популяризатора науки Я. И. Перельмана помогают углубить знания по физике, учат сознательно ими пользоваться.

Радунская И. Л. «Безумные» идеи. Изд. 2. М., «Молодая гвардия», 1967. 416 с. (Эврика).

Квантовая физика и теория относительности — таковы области физики, представленные автором в этой книге.

Радунская И. Крушение парадоксов. М., «Молодая гвардия», 1971. 224 с.

Популярные очерки о современной физике.

Роджерс Э. Физика для любознательных. Пер. с англ. Т. 1—3. М., «Мир», 1969—1971. Т. 1. Материя, движение, сила, 1969. 478 с. Изд. 2, испр., 1972. 474 с. Т. 2. Наука о Земле и Вселенной. Молекулы и энергия, 1970. 652 с. Т. 3. Электричество и магнетизм. Атомы и ядра, 1971. 664 с.

Седов Е. А. Занимательно об электронике. М., «Молодая гвардия», 1966. 352 с. (Эврика).

О том, как был открыт электрон и как ученые познакомились с его свойствами и научились управлять им, о перспективах возникновения всемирной радиосвязи, освоении сверхвысоких частот и создании кибернетических устройств.

Смилга В. П. Очевидное? Нет, еще неизведанное... Изд. 2. М., «Молодая гвардия», 1966. 350 с. (Эврика).

Популярное изложение основ теории относительности.

Соболев Н. А. Лазеры и их будущее. М., Атомиздат, 1968. 200 с. (Научно-популярная б-ка).

Толанский С. Удивительные свойства света. Пер. с англ. М., «Мир», 1969. 136 с. с ил.

Наблюдения и простейшие опыты по многократному отражению, интерференции, доплеровскому эффекту, история открытия оптических законов.

Томилин А. Н., Теребинская Н. В. Для чего ничего? М., «Детская литература», 1965. 208 с.

Что такое вакуум, как он получается на Земле, каков вакуум в межпланетном пространстве, какое практическое применение находит теперь высокое разрежение, какова физическая картина мира — вот вопросы, затронутые в книге.

Шварц Дж. Как это произошло? Иллюстрированный рассказ о том, как теория относительности устанавливает связи причин и следствий. Пер. с англ. М., «Мир», 1965. 159 с.

Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов. Пер. с англ. Изд. 4. М., «Молодая гвардия», 1966. 267 с. с ил. (Эврика).

Эллиот Л., Уилкокс У. Физика. Пер. с англ. Изд. 2. М., Физматгиз, 1967. 807 с. с ил.

Как и из чего вещество построено

Адлер И. Внутри ядра. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1968. 151 с. (Научно-популярная б-ка).

Увлекательное изложение современной теории строения ядра, новейших взглядов на природу ядерных сил, эволюцию элементов.

Азимов А. Нейтрино — призрачная частица атома. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1969. 144 с.

Известный ученый, писатель и популяризатор науки знакомит с современными представлениями о самой неуловимой из элементарных частиц — нейтрино.

Андерсон Д. Открытие электрона (развитие атомных концепций электричества). М., Атомиздат, 1968. 159 с.

Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. Изд. 2. М., Атомиздат, 1966, 200 с.

Рассказ о свойствах плазмы и перспективах ее применения для получения термоядерной энергии.

Балабанов М. Солнце на Земле. Рассказы об атоме, атомном ядре и их энергии. Изд. 2, доп. М., «Молодая гвардия», 1964. 274 с. с ил.

Беккерман И. М. Невидимое оставляет след. Изд. 2. М., Атомиздат, 1970. 208 с.

Рассказ о том, как ученые обнаруживают элементарные частицы, как устроены и где применяются камера Вильсона и пузырьковая камера.

Гладков К. А. Атом от А до Я. М., Атомиздат, 1967. 171 с.

Гладков К. А. Атом от А до Я. М., Атомиздат, 1967. «Детская литература», 1968. 448 с. с ил.

Популярная книга-энциклопедия о строении атома и атомной энергии, о том, как удалось поставить эту энергию на службу человеку.

Данин Д. С. Неизбежность странного мира. Изд. 3. М., «Молодая гвардия», 1966. 375 с. (Эврика).

Автор вводит читателя в мир идей и представлений современной физики, рассказывает об элементарных частицах материи.

Кнорре Е. Путешествие в мир трансуранов. М., Атомиздат, 1971. 158 с.

Автор знакомит с трансуранами — тяжелыми элементами, которые располагаются в таблице Менделеева после урана; с исследованиями, проводимыми в совре-

менной ядерной физике, новейшими представлениями о природе атомных ядер и их получении.

Колычев Б. С. Атом утоляет жажду. М., Атомиздат, 1965. 84 с.

О том, как ядерная энергия помогает опреснять морскую воду.

Милантьев В. П., Темко С. В. Физика плазмы. М., «Просвещение», 1970. 159 с. (Б-ка школьника).

Что такое плазма и как изучаются ее свойства? Как ведет себя плазма в электрическом и магнитном полях? Как возникают и распространяются в плазме колебания и волны? Каковы перспективы использования плазмы? На все эти вопросы вы найдете ответ в книге.

Мухин К. Н. Занимательная ядерная физика. Изд. 2, перераб. и доп. М., Атомиздат, 1972. 296 с.

Книга дает достаточно полное представление об основах ядерной физики, ее достижениях и применениях, взаимоотношениях с другими науками и еще нерешенных проблемах.

Мякишев Г. Я. Элементарные частицы. М., «Просвещение», 1968. 176 с.

Основные вопросы этой книги: ядерные, электромагнитные и слабые взаимодействия; законы сохранения; теория относительности и квантовая механика; свойства и современная классификация частиц.

Парнов Е. И. На перекрестке бесконечностей. М., Атомиздат, 1967. 462 с.

Книга знакомит с современной физической картиной мира, с представлениями о пространстве, времени, веществе, с тем, как человек постигал тайны Вселенной и тайны атома.

Сиборг Г. Искусственные трансурановые элементы. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965. 168 с.

Об искусственно созданных химических элементах, их получении, свойствах и перспективах применения.

Сиборг Г. Т., Вэленс Э. Г. Элементы Вселенной. Изд. 2, испр. Пер. с англ. М., «Наука», 1966. 264 с.

Эту книгу для детей написали крупнейшие американские физики. Она знакомит с широким кругом явлений — от строения атомов до законов Вселенной; рассказывает о том, как физика проникает в тайны вещества и мироздания.

Трифонов Д. Н. Радиоактивность вчера, сегодня, завтра. М., Атомиздат, 1966. 111 с. (Научно-популярная б-ка).

Что такое радиоактивность? Какое влияние на наши представления о периодической системе элементов оказывает изучение этого явления? Каковы пути разгадки проблемы управляемого распада и что дало бы ее решение? Таково основное содержание книги.

Фиалков Ю. Я. Ядро — выстрел! М., «Детская литература», 1966. 176 с. с ил.

Книга знакомит с открытием радиоактивности, свойствами и применением радиоактивных элементов и методом «меченых» атомов.

Фомин Б. В. От искры до лазера. Изд. 2, доп. М., «Знание», 1967. 160 с.

Книга знакомит со свойствами плазмы — четвертого состояния вещества, с квантовыми генераторами света — лазерами и их разнообразными применениями в настоящем и будущем.

Юнг Р. Ярче тысячи солнц. Повествование об ученых-атомниках. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1961. 280 с. с ил.

Краткая история «атомного века», начиная с открытия радиоактивности и кончая взрывом атомной бомбы.

Превращения вещества

Азерников В. З. 200 лет спустя. М., «Детская литература», 1967. 136 с. Книга об опасных путешествиях, случайных находках, важных открытиях, замечательных людях. И вместе с тем она о каучуке, ибо всё самым тесным образом переплелось в его истории.

Андреева Е. В. Без соли не проживешь. Л., Детгиз, 1963. 174 с. с ил.

Андреева Е. В. Химия жизни. Л., «Детская литература», 1967. 192 с. с ил.

Рассказ о происхождении жизни на Земле, круговороте веществ, о ферментах и витаминах, о роли отдельных элементов в жизни клетки.

Бахтамов Р. Властелин Окси-мира. М., «Детская литература», 1965. 219 с. с ил.

Увлекательный рассказ о кислороде и его соединениях, о применении их в технике.

Бережной Ю. Н., Синедубский В. С. Химия — электричество. М., «Советская Россия», 1966. 125 с. с ил.

Книга о настоящем и будущем электрохимии: проблема создания экономичного аккумулятора, топливных элементов и электрохимических преобразователей, получение чистых и сверхчистых веществ.

Бобров Л. В. Глазами Монжа — Бертолле. [М.], «Молодая гвардия», 1964. 320 с.

Применение математических методов в химии.

Васин М. Два шага до чуда. Л., «Детская литература», 1966. 176 с. с ил.

О достижениях современной химии.

Вилле Г. Г. Чудесный мир воды. Пер. с нем. Л., Детгиз, 1963. 142 с. с ил.

В главе «Вода в реторте» рассказано о том, кто и как открыл химический состав воды; что такое перекись водорода; как разлагают воду на составные части; почему вода бывает «мягкой» и «жесткой».

Власов Л. Г., Трифонов Д. Н. Занимательно о химии. Изд. 2, перераб. и доп. М., «Молодая гвардия», 1968. 255 с. (Эврика).

Маленькие рассказы о периодической системе, реакциях и соединениях, химическом анализе, практических достижениях химии.

Вольпер И. М. Юным химикам. М., «Молодая гвардия», 1965. 111 с. (В помощь пионеру-инструктору).

Основное содержание книги составляют материалы о работе «Клуба юных любителей химии» (описание опытов, применение полученных химических знаний в работе на пришкольном участке, в саду, на животноводческой ферме и т. п.).

Даванков А. Б. Иониты. М., «Знание», 1970. 45 с.

Брошюра знакомит со свойствами и получением ионообменных смол и применением их в различных отраслях промышленности.

Дамаскин Б. Б., Петрий О. А. Современная электрохимия. М., «Наука», 1965. 111 с.

История развития электрохимии и ее практическое использование, электрохимические реакции, превращение химической энергии топлива в электрическую.

Денисов А. А. Пароль: «Синтетика». М., «Советская Россия», 1968. 191 с.

О свойствах и применении разнообразных синтетических материалов.

Денисов А. А. Формула неизведанного. М., «Советская Россия», 1965. 72 с.

Рассказ о работе ученых по созданию кремнийорганиче-

ческих соединений — силиконов, их удивительных свойствах и применении.

Зубарев Г. Твои друзья — полимеры. М., «Детская литература», 1965. 128 с. с ил.

Книга о полимерах — их получении и свойствах, многообразных применениях в технике, промышленности, медицине и быту, в космонавтике.

Ильин Б. Биография великой волшебницы. М., «Детская литература», 1964. 159 с. с ил.

Рассказ о том, как люди проникли в тайны вещества, как возникла и развивалась органическая химия.

Кемпбел Дж. А. Почему происходят химические реакции. Пер. с англ. М., «Мир», 1967. 159 с.

Книга раскрывает секреты химических реакций, знакомит с основными законами химической кинетики, подводит читателя к пониманию физического смысла химических реакций — процессов разрушения и образования межатомных связей.

Кнунянц И. Л., Фокин А. В. Мир фторуглеродов. (Новые соединения фтора). М., «Знание», 1968. 62 с.

Тема этой брошюры — свойства, получение и применение фтора и его соединений в ракетной технике, холодильной промышленности, для создания смазочных, поверхностноактивных, лекарственных веществ и синтетических материалов.

Крупин В. Д. Карлики рождают гигантов. Изд. 2. М., «Молодая гвардия», 1969. 224 с. с ил.

Очерки о биохимии.

Ляпунов Б. В. Химия завтра. М., «Детская литература», 1967. 191 с. с ил.

О роли химии в нашей жизни, об успехах химической науки и ее горизонтах.

Неисчерпаемый. Сборник. М., «Молодая гвардия», 1964. 496 с. с ил.

Статьи разных авторов об углероде и его соединениях.

Путешествие в страну элементов. Сборник. М., «Молодая гвардия», 1963. 368 с. с ил.

Авторы сборника знакомят со свойствами химических элементов, составляющих неживую природу, а также с элементами, полученными искусственным путем.

Розен Б. Я. Чудесные добавки. Л., «Детская литература», 1964. 183 с. с ил. (Школьная б-ка).

Микроэлементы, их значение в жизни человека, животных и растений, применение в сельском хозяйстве.

Роут Дж. И. Химия XX века. Пер. с англ. М., «Мир», 1966. 424 с. с ил.

Книга знакомит с новыми разделами современной химии и ее историей. Часть первая посвящена неорганической и физической химии, часть вторая — органической химии, часть третья — химии жизни.

Таубе П. Р., Руденко Е. И. От водорода до...? Изд. 4. М., «Высшая школа», 1968. 407 с.

Читая эту книгу, вы совершите путешествие по периодической системе элементов, узнаете об истории их открытия, свойствах и применении.

Толстогузов В. Б. Неорганические полимеры. М., «Наука», 1967. 202 с.

Рассказ о химических свойствах и строении полимеров, методах их синтеза и о том, какие элементы периодической системы могут участвовать в их создании.

Тонгур В. С. На пороге разгадки. Химия жизни. М., «Знание», 1966. 174 с.

Биополимеры, структура белковых молекул и проблема синтеза белка, передача наследственной информации, химические основы жизни — таков круг вопросов, затронутых в этой книге.

Фигуровский Н. А. Открытие химических элементов и происхождение их названий. М., «Наука», 1970. 207 стр. (Научно-популярная серия).

Хоффман К. Б. Химия для всех. Пер. с англ. М., «Мир», 1965, 400 с.

Популярное изложение элементарных основ современной химии: о строении атома, химии неорганических соединений, теории растворов, органической химии, биохимии.

Шпаусцус З. Путешествие в мир химии. Пер. с нем. Изд. 2. М., «Просвещение», 1967. 431 с.

Книга знакомит со свойствами химических элементов и их соединений, применением в быту и промышленности, с основными законами и теориями химии.

Шпаусцус З. Путешествие в мир органической химии. Пер. с нем. М., «Мир», 1967. 220 с.

Увлекательный рассказ о путях развития органической химии и достигнутых ею практических успехах. В книге много иллюстраций и схем, поясняющих устройство приборов и технологические процессы.

Биографии ученых

Аникеев В. В. Кванты в руках держащий. Невыдуманная микроповесть о человеке, посрамившем инженера Гарина. М., «Молодая гвардия», 1969. 95 с. (Твой ровесник).

Об академике Н. Г. Басове.

Асташенков П. Т. Курчатов. Изд. 2. М., «Молодая гвардия», 1968. 200 с. (Жизнь замечательных людей).

Бобров Л. В. Тени невидимого света. Научно-биографический рассказ о В. К. Рентгене. М., Атомиздат, 1964. 114 с. с ил.

Гумилевский Л. И. Зинин. М., «Молодая гвардия», 1965. 271 с. (Жизнь замечательных людей).

Данин Д. С. Резерфорд. Изд. 2. М., «Молодая гвардия», 1967. 621 с. (Жизнь замечательных людей).

Капустинская К. А. Анри Беккерель. М., Атомиздат, 1965. 83 с.

Келер В. Р. Сергей Вавилов. М., «Молодая гвардия», 1961. 240 с. (Жизнь замечательных людей).

Кокин Л. Юность академиков. М., «Советская Россия», 1970. 190 с. с ил.

Документальный очерк о жизни и работе советских физиков в первые годы Советской власти. В книге рассказано об А. Ф. Иоффе и его сотрудниках — Н. Н. Семенове, Я. И. Френкеле, П. Л. Капице, Л. Д. Ландау, И. В. Курчатове.

Кудрявцев П. С. Исаак Ньютон. Изд. 3. М., Учпедгиз, 1963. 142 с. с портр. и ил. (Классики физики).

Кудрявцев П. С. Фарадей. М., «Просвещение», 1969. 167 с. (Люди науки).

Латиль П. Энрико Ферми. Сокр. пер. с франц. М., Атомиздат, 1965. 147 с.

Ливанова А. М. Физики о физиках. М., «Молодая гвардия», 1968. 255 с. (Эврика).

О П. Н. Лебедеве, А. Эйнштейне, А. А. Фридмане, А. Ф. Иоффе, И. В. Курчатове, Л. И. Мандельштаме, А. А. Андронове.

Львов В. Е. Жизнь Альберта Эйнштейна. М., «Молодая гвардия», 1959. 382 с. (Жизнь замечательных людей).

Мак-Дональд Д. Фарадей, Максвелл и Кельвин. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1967. 157 с.

Могилевский Б. Л. Живи в опасности! Повесть о великом химике Гемфри Дэви. М., «Детская литература», 1970. 240 с.

Мур Р. Нильс Бор — человек и ученый. Пер. с англ. М., «Мир», 1969. 470 с.

Нилов Е. Зелинский. М., «Молодая гвардия», 1964. 256 с. (Жизнь замечательных людей).

Пиотровский К. В. Сергей Лебедев. М., «Молодая гвардия», 1961. 238 с. (Жизнь замечательных людей).

Писаржевский О. Н. В огне исканий. Штрихи творческого портрета Н. Н. Семенова. М., «Советская Россия», 1965. 133 с. (Люди Советской России).

Писаржевский О. Н. Дмитрий Иванович Менделеев. М., Изд-во АН СССР, 1959. 391 с.

Писаржевский О. Н. Наука древняя и молодая. М., «Молодая гвардия», 1962. 208 с.

Очерки о работах выдающихся химиков Н. Д. Зелинского, С. В. Лебедева, А. Н. Несмеянова, Н. Н. Семенова, В. А. Каргина, П. А. Ребиндера, В. А. Энгельгардта.

Шаскольская М. П. Фредерик Жолио-Кюри. Изд. 2. М., «Молодая гвардия», 1966. 208 с. (Жизнь замечательных людей).

Шаховская Н. Д., Шик М. В. Повелитель молний Майкл Фарадей. Повесть о жизни (для детей). М., «Молодая гвардия», 1968. 174 с. с ил.

Справочный отдел

Измерения и меры

Завельский Ф. С. Взвешивание миров, атомов и элементарных частиц. М., Атомиздат, 1970. 176 с.

Основная тема книги — измерительная техника и измерения, которые производятся в физике (раздел «Взвешивание тел микромира»). Автор рассказывает о том, как складывались понятия о массе и энергии, как совершенствовались приборы для измерений, как создавалась современная Международная система единиц. Раскрывается взаимосвязь науки и измерительной техники.

Научно-популярные альманахи, ежегодники, журналы, библиотеки

Библиотечка для физико-математических школ. М., «Наука». Серия «Физика».

Книги для учащихся, интересующихся физикой, например: *Коган Б. Ю.* Размерность физических величин (1968); *Боровой А. А., Финкельштейн Э. Б.* и *Херувимов А. Н.* Законы электромагнетизма (1970) и др.

Популярная библиотека химических элементов. М., «Наука». Т. 1 «Водород — хром», 1971. 359 с. с ил.; т. 2 «Марганец — олово», 1972. 318 с. с ил.; т. 3 «Сурьма — висмут», 1973. 248 с. с ил.

Первые три книги четырехтомной популярной энциклопедии, посвященной всем химическим элементам, известным человечеству. В основе «Библиотеки» — материалы, опубликованные в журнале «Химия и жизнь» и дополненные новыми научными данными.

Наука и человечество. Доступно и точно о главном в мировой науке. М., «Знание», 1962—1972. 1962. 412 с. с ил.; 1963. 526 с. с ил.; 1964. 432 с. с ил.; 1965. 408 с. с ил.; 1966. 399 с. с ил.; 1967. 424 с. с ил.; 1968. 400 с. с ил.; 1969. 400 с. с ил.; 1970. 397 с. с ил.; 1971. 331 с. с ил.: 1972. 400 с. с ил. (Издание продолжается.)

Ежегодник, издаваемый Академией наук СССР и Всесоюзным обществом «Знание», содержит научно-популярные статьи советских и зарубежных ученых о проблемах и успехах современной науки, в том числе физики, химии, биохимии. Постоянные разделы: Человек. Земля. Микромир. Вселенная. Технический прогресс.

Эврика. Сборники. М., «Молодая гвардия», 1963—1972. 1963. 352 с.; 1964. 280 с.; 1965. 367 с.; 1966. 360 с.; 1967. 380 с.; 1968. 398 с.; 1969. 432 с.; 1970. 432 с.; 1971. 432 с.; 1972. 496 с. (Издание продолжается.)

В ежегоднике три постоянных раздела — «Идеи», «Поиски», «Решения». Сборники составляются из материалов, опубликованных в газетах и журналах. Над чем думают и о чем спорят ученые? Что проверяют экспериментаторы и находят искатели? Какие плоды научных открытий отданы практике? О важных и серьезных научных идеях, поисках, решениях последнего времени (в том числе в области химии и физики).

Хочу все знать! Л., «Детская литература», 1957—1972. 1957, 280 с.; 1959. 280 с.; 1960. 280 с.; 1961. 304 с.; 1963. 338 с.; 1964. 320 с.; 1965. 320 с.; 1966. 320 с.; 1967. 335 с.; 1968. 384 с.; 1969. 368 с.; 1970. 352 с.; 1971. 384 с. с ил.; 1972. 352 с. (Издание продолжается.)

Альманах знакомит школьников с достижениями в различных областях науки.

Знание — сила. Ежемесячный научно-популярный и научно-художественный журнал для молодежи. М., «Знание». Выходит с 1925 г.

Помещает статьи и очерки о достижениях физики и химии, об использовании их в технике и промышленности.

Квант. Научно-популярный физико-математический журнал Академии наук СССР и Академии педагогических наук СССР. М., «Наука». Выходит с 1970 г.

Журнал рассчитан на учащихся старших классов, интересующихся физикой. В нем помещаются статьи, охватывающие практически все основные направления развития современной физической науки. Кроме того, проводятся описания опытов (раздел «Лаборатория «Кванта»), задачи и их решения. Регулярно ведется раздел «Практикум абитуриента» — для тех, кто хочет поступить на физические факультеты.

Наука и жизнь. Ежемесячный научно-популярный журнал Всесоюзного общества «Знание». М. Выходит с 1934 г.

В журнале систематически печатаются статьи по различным проблемам науки, в том числе физики, химии, биохимии. Ведется раздел «Готовьтесь к конкурсным экзаменам». В разделе «Люди науки» помещаются очерки об известных ученых и их работах.

Природа. Ежемесячный популярный естественнонаучный журнал Академии наук СССР. М., «Наука». Выходит с 1912 г.

Печатает статьи ученых о проблемах и достижениях естественных наук. Имеются специальные разделы, посвященные физике и химии.

Химия и жизнь. Ежемесячный научно-популярный журнал Академии наук СССР. М., «Наука». Выходит с 1965 г.

В журнале печатаются статьи по различным вопросам химии и смежных с ней наук. В разделе «Юный химик» публикуются простые опыты, проводятся викторины, даются советы и разбираются задачи по химии.

Словарь-указатель

А

Абсолютно черное тело
— тело, полностью поглощающее падающее на него электромагнитное излучение.
168, 169

Абсолютный нуль
— теоретически наинизшая температура.
149, 150, 152—158, 444, 517

Авогадро число
241, 447, 518, 523

Адиабатический процесс
— процесс, происходящий без теплового обмена со средой.
104, 126, 139, 162

Адсорбент
— искусственное или природное тело с развитой поверхностью, способное поглощать (адсорбировать) вещества из окружающей среды.
446

Адсорбция
— поглощение какого-либо вещества из газообразной среды или раствора поверхностным слоем жидкости или твердого тела.
446, 447

Актиноиды
— радиоактивные элементы третьей группы седьмого периода периодической системы химических элементов.
358, 384, 400

Ализарин
— органический краситель красного цвета.
461

Алкалоиды
— азотсодержащие органические вещества растительного происхождения, обладающие физиологической активностью.
426

Аллотропия
— существование одного и того же химического элемента в виде нескольких простых веществ, различных по строению и свойствам, так называемых аллотропических модификаций.
163, 392, 397, 400

Альфа-распад
— испускание альфа-частиц атомными ядрами при радиоактивном распаде.
291

Альфа-частица
— ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов.
277—285, 333

Амидная связь
— связь углерода карбонильной группы с азотом аминогруппы в органических соединениях.
490

Аминокислоты
— класс органических соединений, объединяющих в себе свойства кислот и аминов, т. е. содержащих наряду с карбоксильной группой аминогруппу.
459, 489, 502—507

Аморфное состояние
— твердое состояние вещества, при котором его свойства не зависят от направления атомов или молекул в веществе.
480

Ампер, Андре Мари
(1775—1836) — французский физик и математик.
176, 222, 229—233, 260, 520

Ангстрем, Андерс Йонас
(1814—1874) — шведский физик.
520

Анизотропия
— свойство вещества, заключающееся в изменении физических (механических, тепловых, электрических и др.) свойств в зависимости от направления.
240

Аниониты
— твердые природные или искусственные вещества, способные обменивать свои отрицательные ионы.
433

Аннигиляция
132

Антибиотики
— вещества биологического происхождения, синтезируемые микроорганизмами и подавляющие рост бактерий и других микробов, а также вирусов.
426, 500

Антивещество
— вещество, состоящее из античастиц.
274, 275

Антиферромагнетики
263—265

Античастицы
— элементарные частицы (позитрон, антипротон, антинейтрон и др.), отличающиеся от обычных элементарных частиц (электрона, протона, нейтрона и др.) знаком электрического заряда или магнитного момента.
272, 274

Архимеда закон
46, 446

Арцимович, Лев Андреевич
(1909—1973) — выдающийся советский физик.
103

Астродинамика
— раздел небесной механики, изучающий движение искусственных спутников небесных тел, автоматических межпланетных станций.
75

Астроориентация
— определение положения летательного аппарата относительно «неподвижных» звезд.
78

Атомная единица массы ($1{,}66 \cdot 10^{-24}$ г)
— единица измерения массы атомов, молекул и элементарных частиц, равная $^1/_{12}$ массы изотопа углерода с массовым числом 12.
523

Атомный вес, атомная масса химического элемента
— значение массы атома, выраженное в атомных единицах массы.
312, 325—327, 336, 405, 523

Атомный номер
— порядковый номер химического элемента в периодической системе элементов Менделеева, равный числу протонов в атомном ядре или числу электронов в нейтральном атоме данного элемента.
278, 337, 374

Атомный (ядерный) реактор
298—312

Аэродинамика
49

Аэродинамическая труба
— установка для исследования поведения обтекаемых тел в газовом потоке.
51, 52

Аэродинамическое качество
— отношение подъемной силы самолета к сопротивлению среды.
47, 50, 54, 83, 84

Аэрозоль
— система, состоящая из мелких твердых или жидких частиц, взвешенных в газообразной среде.
389

Б

Баллистика
— наука о движении артиллерийских снарядов, пуль, мин, реактивных снарядов и т. п.
83, 84

Барионы
— общее название тяжелых элементарных частиц.
269

Белки
— высокомолекулярные природные органические вещества, построенные из аминокислот; важнейшая составная часть всех живых организмов.
489, 501—507

Бернулли, Даниил
(1700—1782) — швейцарский математик и механик, в 1725—1733 гг. работал в России.
50, 91

Бернулли закон
50, 91—94

Берцелиус, Йёнс Якоб
(1779—1848) — шведский химик и минералог.
392

Бета-распад
— радиоактивный распад атомного ядра, со-

провождаемый испусканием из ядра электронов или позитронов, а также нейтрино.
287, 290, 292

Бета-частицы
— элементарные частицы, электроны или позитроны, испускаемые ядрами атомов при бета-распаде.
277, 278

Бинауральный эффект
— способность человека и животных определять, в каком направлении от них находится звучащее тело.
110

Биополимеры
— высокомолекулярные природные соединения (белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды и др.), являющиеся структурной основой всех живых организмов.
459

Бойль, Роберт
(1627—1691) — английский химик и физик.
420, 461

Бойля — Мариотта закон
104

Больцман, Людвиг
(1844—1906) — австрийский физик.
148

Больцмана постоянная
— одна из основных универсальных физических постоянных, равная отношению газовой постоянной к числу Авогадро.
523

Бор, Нильс Хенрик Давид
(1885—1962) — датский физик.
45, 170—173, 345

Бунзен, Роберт Вильгельм
(1811—1899) — немецкий химик.
203, 204

Бутлеров, Александр Михайлович
(1828—1886) — русский химик.
462, 463, 473

В

Ван-дер-Ваальс, Ян Дидерик
(1837—1923) — голландский физик.
125

Ван-дер-Ваальса уравнение
125

Вес тела
— сила, с которой покоящееся тело действует на подвес или опору.
516

Вёлер, Фридрих
(1800—1882) — немецкий химик.
396, 462

Вильсона камера
— прибор, с помощью которого можно видеть след движущейся элементарной частицы.
269

Волновод
186—189, 191

Волны де Бройля
200, 201

Вольта, Алессандро
(1745—1827) — итальянский физик и физиолог.
522

Восстановительные реакции
438

Вулканизация
— процесс превращения «сырого», пластичного каучука в резину.
472

Вынужденное (индуцированное) излучение атома
— излучение атомом кванта света под действием другого точно такого же кванта.
174, 175

Г

Гадолинит
330

Газотрон
— двухэлектродный ионный прибор, применяемый в высоковольтных выпрямителях.
315

Галилей, Галилео
(1564—1642) — итальянский физик, механик и астроном.
15, 23, 126, 129, 201, 204

Гальванические элементы
— источники электрического тока, получаемого за счет химической реакции.
131, 438, 439

Гальванопластика
— получение точных металлических копий методом электролитического осаждения металла на поверхности оригинала.
116

Гамма-излучение
— коротковолновое электромагнитное излучение.
292, 293

Ган, Отто
(1879—1968) — немецкий физик и радиохимик.
287, 299

Гармонические колебания
— колебания, при которых физическая величина изменяется по синусоидальному закону.
206

Гей-Люссак, Жозеф Луи
(1778—1850) — французский химик и физик.
104, 134, 135, 392

Гель
— студнеобразное состояние растворов.
449

Гем
— небелковая часть гемоглобина.
501

Гемоглобин
— красный пигмент крови, сложный белок.
502

Ген
— элементарная единица наследственности, представляющая собой отрезок ДНК.
496, 500

Генератор молекулярный
194

Генетический код
— универсальный метод записи биологической наследственной информации, единый для микроорганизмов, растений и животных. В основе генетического кода лежат последовательности трех нуклеотидов, каждая из которых соответствует определенной аминокислоте белка.
496

Герц, Генрих Рудольф
(1857—1894) — немецкий физик.
168, 177, 226, 237, 521

Гесс, Герман Иванович
(1802—1850) — русский химик.
136, 335

Гидриды
— соединения химических элементов с водородом.
409

Гидроксония ион
— химическое соединение протона с молекулой воды.
414

Гидролиз
— разложение вещества водой.
502

Гидролокатор
— прибор для обнаружения тел в воде при помощи звуковых сигналов.
118

Гидротермальный синтез
165

Гидрофильность
— понятие, характеризующее сродство вещества к воде.
446—449

Гидрофобизация
— процесс создания у материалов водоотталкивающих свойств.
445—449

Гиперзвук
— упругие волны с частотой, большей, чем частота ультразвуковых волн.
260

Гипероны
— тяжелые нестабильные элементарные частицы.
9, 224

Гирон
42

Гироскоп
— прибор, основанный на свойстве вращающихся вокруг оси тел (волчков) сохранять направление оси вращения.
32—46, 79

Гистерезиса петля
263

Голография
194, 208, 209

Гормоны
— биологически активные вещества, вырабатываемые железами внутренней секреции.
426, 501

Гравитация (тяготение)
— способность всех без исключения тел притягиваться друг к другу силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.
223, 523

Гука закон
19

Гюйгенс, Христиан
(1629—1695) — голландский механик, физик и математик.
167, 196, 219

Д

Давление
158—167

Дальтон, Джон
(1766—1844) — английский физик и химик.
338

Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК)
— основная составная часть наследственного вещества в ядрах живых клеток.
9, 493—498

Дейтерий
— стабильный изотоп водорода с массовым числом 2.
312, 313, 401

Дейтрон
— ядро атома дейтерия, состоящее из протона и нейтрона.
268, 288, 313

Десорбция
— удаление частиц адсорбированного вещества с адсорбента. Десорбция обратна адсорбции.
428

Детонация
— процесс химического превращения взрывчатого вещества, сопровождающийся освобождением энергии и распространяющийся по веществу в виде волны от одного слоя к другому со сверхзвуковой скоростью.
468

Дефектоскоп ультразвуковой
— прибор для обнаружения дефектов изделий с помощью ультразвука.
120

Джоуль, Джеймс Прескотт
(1818—1889) — английский физик.
118, 135, 137, 267, 522

Диамагнетики
156, 261, 262

Диссонанс
— одновременное звучание двух или нескольких тонов, неприятное на слух.
113

Диссоциация
— распад молекул на две или несколько частей.
414

Дифракция
— способность волн огибать предметы, размеры которых соизмеримы с длиной волны.
167, 205, 206

Диффузия
— перемещение частиц, приводящее к выравниванию их концентрации в заданном объеме.
444

Диэлектрики
— вещества, обладающие малой электропроводностью, в которых может долгое время существовать электрическое поле.
238, 244, 246

Диэлектрическая проницаемость
— отношение напряженности электрического поля в вакууме к напряженности в данной среде.
414

Домены
— макроскопические участки объема ферромагнитного кристалла с самопроизвольной намагниченностью.
262

Доплера эффект
— изменение частоты колебаний, воспринимаемой наблюдателем при движении источника и наблюдателя относительно друг друга, в зависимости от скорости источника или наблюдателя.
110, 203, 215

Дуанты
— название полюсов магнита в ускорителях элементарных частиц.
381

Дэви, Гемфри
(1778—1829) — английский физик и химик.
388

Е

Емкость электрическая
— мера способности проводника удерживать электрический заряд.
180

Ж

Жесткость воды
— свойство природной воды, определяемое присутствием в ней растворенных солей кальция и магния.
433

Жиры
— сложные эфиры глицерина и жирных кислот.
501, 502, 505

Жолио-Кюри, Ирен
(1897—1956) — французский физик.
286, 290

Жолио-Кюри, Фредерик
(1900—1958) — французский физик.
286, 290

Жуковский, Николай Егорович
(1847—1921) — русский ученый, основоположник современной гидро- и аэромеханики.
43, 46, 47, 52, 100

Жуковского правило
42, 43

З

Закон постоянства состава
248

Законы сохранения
19, 49, 223, 266—275

Звуковой барьер
47—49

Зееман, Питер
(1865—1943) — нидерландский физик.
203

Зеемана эффект
— расщепление уровней энергии атомов в магнитном поле, обнаруживаемое по расщеплению спектральных линий.
203, 265

Зелинский, Николай Дмитриевич
(1861—1953) — советский химик-органик.
468

Зинин, Николай Николаевич
(1812—1880) — русский химик-органик.
461

Зона валентная
245

Зона проводимости
245

И

Игнитрон
— управляемый ртутный выпрямитель.
315

Идеальный газ
— газ, у которого молекулы не имеют размера и не взаимодействуют друг с другом. Реальные газы приближаются по своим свойствам к идеальному газу при очень больших разбавлениях и повышенных температурах.
129, 131, 139, 140

Изобары (в ядерной физике)
293

Изомеры (химические)
— изомерные соединения — химические соединения, имеющие одинаковый состав и молекулярный вес, но отличающиеся между собой по

химическому строению, физическим и химическим свойствам.
426

Изомеры (ядерные)
293, 383

Изопрен
— ненасыщенный углеводород, мономер природного каучука.
459, 484

Изопреновый каучук
— синтетический каучук, полученный полимеризацией изопрена.
484

Изотермический процесс
— процесс, протекающий при постоянной температуре.
104, 126, 165

Изотопы
— атомы одного и того же элемента, в ядрах которых содержится разное число нейтронов.
280, 336, 401

Изотопный обмен
— химическая реакция, в результате которой между реагирующими веществами происходит перераспределение изотопов какого-либо элемента, входящего в состав этих веществ, например: $H_2O + HD \longrightarrow HDO + H_2$.
404

Инверсии температуры
152

Ингибитор
— вещество, замедляющее химическую реакцию.
424

Индиго
— органический синий краситель.
461

Инжектор плазменный
323

Инсулин
— гормон поджелудочной железы.
500

Интерференция
— сложение двух волновых процессов, в результате чего в разных точках пространства получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.
167, 206, 207

Интерферометр
— оптический прибор, основанный на применении интерференции, с помощью которого можно измерять длины волн, контролировать форму и чистоту обработки поверхности, измерять малые угловые расстояния и др.
187, 206

Интерфероны
500

Инфразвук
117

Ионизационная камера
— прибор для исследования ионизирующих излучений.
309, 382

Ионизация
190

Ионообменные смолы
— природные или искусственные твердые материалы, способные к ионному обмену. Их делят на катиониты и аниониты.
433, 488

Иоффе, Абрам Федорович
(1880—1960) — советский физик.
256

K

Кавитация
— нарушение сплошности внутри текущей жидкости.
121

Капрон
— синтетическое волокно, получаемое полимеризацией капролактама.
474

Карно, Никола Леонар Сади
(1796—1832) — французский физик и инженер.
137—139

Карно цикл
137—140

Каталаза
— один из наиболее активных ферментов; катализирует разложение перекиси водорода на воду и молекулярный кислород.
492

Катализ
— ускорение протекания химических реакций под влиянием небольших добавок веществ — катализаторов, не изменяющихся в процессе реакции.
257, 423

Катализатор
— вещество, изменяющее скорость химической реакции.
423, 456, 468, 492

Катиониты
433

Каучук природный
— эластичный материал растительного происхождения, применяемый для изготовления резины.
471, 484

Каучуки синтетические
— эластичные синтетические полимеры, которые подобно натуральному каучуку могут быть переработаны в резину.
468, 483, 484

Квант
— наименьшее количество энергии электромагнитного излучения с данной частотой колебаний.
154, 167, 209

Квантовая механика
— основа физики микромира, теория явлений атомного масштаба.
167, 173, 174, 344

Квантовая электродинамика
— квантовая теория электромагнитного поля и его взаимодействия с заряженными частицами.
174

Квантовый генератор
— источник электромагнитного излучения, основанный на вынужденном излучении атомов или молекул.
209

Кекуле, Фридрих Август
(1829—1896) — немецкий химик.
462

Кельвин (Томсон), Уильям
(1824—1907) — английский физик.
152, 517, 521

Кинетика (химическая)
— учение о скоростях и механизмах химических реакций.
419—421

Кирхгоф, Густав Роберт
(1824—1887) — немецкий физик.
203—204

Клапейрон, Бенуа Поль Эмиль
(1799—1864) — французский физик
124

Клевеит
203

Клистрон
— электронная лампа, применяемая для генерации и усиления колебаний сверхвысоких частот.
188

Когерентность
— согласованное протекание во времени нескольких колебательных процессов.
208

Коллиматор
— оптическое устройство для получения пучков параллельных лучей.
204

Комбинационное рассеяние
— см. *Рамана эффект*

Комплексонные смолы
488, 489

Консонанс
— благозвучное согласованное сочетание звуков при их одновременном звучании.
113

Константа равновесия
422

Константа скорости
421

Концентрация
— величина, выражающая содержание определенной составной части в смеси или в растворе.
420, 421

Коррозия металлов
— разрушение, окисление, растворение металлов под действием окружающей внешней среды.
303, 396, 439, 444

Коэрцитивная сила
— напряженность магнитного поля, необходимая, чтобы свести к нулю остаточную намагниченность в ферромагнетиках.
263

Коэффициент полезного действия
— отношение количества полезной энергии, получаемой от машины, к величине энергии, которая затрачивается этой машиной.
140—143, 438

Крекинг
— процесс, при котором расщепляются молекулы углеводородов под действием высокой температуры, давления и других факторов.
426, 468

Кривая видности
— кривая спектральной чувствительности глаза.
198

Криостат
— прибор для получения постоянной низкой температуры.
157, 252, 265

Кристадин
— радиоприемник с кристаллическим детектором.
252

Кристаллизация
— процесс образования и роста кристаллов.
444

Кристаллогидраты
— кристаллические вещества, содержащие воду.
418

Кристаллы
— твердые тела, атомы, молекулы или ионы которых расположены в определенном порядке.
239—244

Кристаллическая решетка
— правильное расположение атомов, молекул или ионов в кристалле, обладающее периодической повторяемостью в трех измерениях.
241—244

Кулон, Шарль Огюстен
(1736—1806) — французский физик.
224, 225, 229, 230, 522

Кулона закон
171, 225

Курчатов, Игорь Васильевич
(1903—1960) — советский физик.
306, 308—312

Кюри, Пьер
(1859—1906) — французский физик.
117, 286

Л

Лавсан
— синтетическое волокно.
475

Лавуазье, Антуан Лоран
(1743—1794) — французский химик.
268, 421, 461

Лазер
— квантовый генератор или усилитель светового излучения.
157, 175, 179, 209—213, 250

Ламинарность
97

Ландау, Лев Давидович
(1908—1968) — советский физик.
156, 274

Ландсберг, Григорий Самуилович
(1890—1957) — советский физик.
235

Ланжевен, Поль
(1872—1946) — французский физик.
117, 118

Лантаноиды
— химические элементы III группы периодической системы, имеющие порядковые номера 58—71.
400, 435

Лебедев, Петр Николаевич
(1866—1912) — русский физик.
215, 216

Лебедев, Сергей Васильевич
(1874—1934) — советский химик-органик.
473, 477

Лекок де Буабодран, Поль Эмиль
(1838—1912) — французский химик.
330

Ленц, Эмилий Христианович
(1804—1865) — русский физик.
231, 261

Ленца правило
— правило, определяющее направление индуцированного тока.
232, 261

Ле Шателье, Анри Луи
(1850—1936) — французский физикохимик и металловед.
422

Ле Шателье принцип
— правило, характеризующее влияние изменения условия существования системы на положение равновесия.
422

Липиды
— группа органических веществ, включающая жиры и жироподобные вещества (липоиды).
500

Ломоносов, Михаил Васильевич
(1711—1765) — великий русский физик, химик, философ и поэт.
137, 149, 268, 272, 461

Люминофоры
— вещества, в которых под действием внешних факторов возникает люминесценция.
250

М

Магнитная ловушка
— магнитное поле особой конфигурации, способное удерживать плазму в замкнутой области пространства.
321

Магнитный момент
261

Магнитострикция
— изменение формы и размеров тел при намагничивании.
118, 263

Мазер
— квантовый генератор или усилитель индуцированного излучения радиоволн.
157, 175

Майер, Юлиус Роберт
(1814—1878) — немецкий физик.
134—137, 267

Майкельсон, Альберт Абрахам
(1852—1931) — американский физик.
197, 207, 208

Максвелл, Джеймс Клерк
(1831—1879) — английский физик.
168, 171, 176, 177, 230, 236

Максвелла уравнения
176, 177

Мандельштам, Леонид Исаакович
(1879—1944) — советский физик.
235

Мариотт, Эдм
(1620—1684) — французский физик.
104

Марковников, Владимир Васильевич
(1838—1904) — русский химик.
462

Масса
15, 16, 516

Массовое число
— число нуклонов в атомном ядре.
278

Масс-спектрометрический анализ
— метод определения распространенности изотопов и массовых чисел атомов и молекул.
429

Маха число
— отношение скорости движущегося тела к скорости звука.
49

Международная система единиц — СИ (СИ — Система Интернациональная)
513—523

Мезоны
— неустойчивые элементарные частицы с массами, промежуточными между массами электрона и нуклона.
269, 272, 286

Менделеев, Дмитрий Иванович
(1834—1907) — великий русский химик.
286, 324—340, 506

Меншуткин, Николай Александрович (1842—1907) — русский химик
326

Мещерский, Иван Всеволодович (1859—1935) — советский ученый-механик.
23, 25, 26, 68

Мицелла
— коллоидная частица.
449

Модель Уотсона — Крика
495

Модулирование колебаний
— управляемое изменение амплитуды или частоты колебаний радиоволн.
182

Мозли, Генри (1887—1915) — английский физик.
337

Молекула
— мельчайшая частица вещества, обладающая свойствами этого вещества и способная к самостоятельному существованию.
444, 445

Молекулярная масса
— число, показывающее, во сколько раз масса данной молекулы больше $^1/_{16}$ части массы атома кислорода.
105

Моль
138, 518

Монокристалл
— одиночный кристалл.
239

Мономеры
— низкомолекулярные соединения, применяемые для синтеза полимеров.
451, 472

Моющие вещества
448

Муассан, Анри (1852—1907) — французский химик.
388, 389

Мутации
— внезапное изменение в генах или в хромосомах, передающееся потомству и влияющее на признаки организма.
498

Н

Нейтрино
— элементарная частица.
267, 272, 274

Нейтрон
— элементарная частица, входящая в состав атомных ядер.
285, 286, 296

Нейтроны медленные или тепловые
299

Нуклеиновые кислоты и нуклеотиды
460, 494, 495, 501

Нуклоны
— общее название частиц, входящих в состав атомного ядра — протонов и нейтронов.
293, 294

«Нулевая» вода
403

Нулевая энергия
— энергия, которой обладает данное тело при абсолютном нуле температуры.
132

Нутация
— колебательное движение (дрожание) оси вращающегося тела.
32, 33

Ньютон, Исаак (1643—1727) — английский физик, механик, астроном и математик.
23, 96, 104, 202, 204, 521

Ньютона законы
15—17, 23, 47, 96

О

Обертоны
— простые составляющие сложного колебания, имеющие более высокую частоту, чем основная частота колебания.
111

Обри прибор
44

Общая теория относительности
29, 219

«Окислительный потенциал»
388

Октановое число
— условный показатель стойкости легких моторных топлив к детонации при сгорании в карбюраторных двигателях.
468

Олефины
— углеводороды ряда этилена, в них содержится одна двойная связь.
390

Осциллограф
264

П

Парамагнетики
262

Паули, Вольфганг (1900—1958) — швейцарский физик.
45, 344

Паули принцип
— принцип квантовой механики, по которому в данном квантовом состоянии не может быть более одного электрона.
240, 245, 246, 344

Пектиновые вещества
— группа полисахаридов и родственных им веществ.
503

Пельтье эффект
— явление, состоящее в том, что при прохождении электрического тока в месте соединения разных проводников или полупроводников происходит выделение или поглощение тепла.
255

Пепсин
— фермент желудочного сока.
502

Пептиды
— соединения, построенные из двух, трех или многих (полипептиды) аминокислот, связанных при помощи так называемой пептидной связи (—CO —NH —).
492

Перегрузка
59

Период полураспада
— время, в течение которого распадается половина атомов данного радиоактивного вещества.
281

Периодическая система химических элементов
324—360, 380—384

Перкин, Уильям Генри (1838—1907) — английский химик-органик.
461

Пион — (π-мезон)
— элементарная частица.
269

Плазма
— состояние вещества при очень высоких температурах, представляющее газообразную смесь ионов, электронов и нейтральных атомов.
103, 312—324

Планк, Макс Карл Эрнст Людвиг (1858—1947) — немецкий физик.
170, 175, 219

Планка постоянная
169, 170, 201, 523

Планка формула
— закон, описывающий распределение энергии в спектре абсолютно черного тела в зависимости от частоты излучения.
170, 173

Поверхностное натяжение
444—457

Подъемная сила
47, 48

Позитрон
— элементарная частица.
272, 287

Показатель преломления
— отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде.
202

Поливинилхлорид
— продукт полимеризации хлористого винила: $CH_2 = CHCl$.
475

Полидезоксинуклеотид
500

Поликонденсация
476, 477

Полимеризация
477

Полимеры
458, 471—489

Полиморфные модификации
— различные формы кристаллического строения у одного и того же вещества.
163

Полиэтилен
— продукт полимеризации этилена.
469, 473

Полупроводники
238, 244—257

Поляризация света
213, 270, 271

Попов, Александр Степанович
(1859—1906) — русский ученый, изобретатель радио.
114, 177, 178, 182, 237

Порядковый номер элемента
— номер элемента в периодической системе Д. И. Менделеева, равный величине положительного заряда ядра атома элемента.
278

Прецессия
32, 33

Промотор
— вещество, усиливающее активность катализатора.
423

Протий
— самый легкий изотоп водорода.
401

Протон
— стабильная элементарная частица с единичным положительным зарядом, атомное ядро самого распространенного изотопа водорода — протия.
269, 523

Пуазейль, Жан Луи Мари
(1799—1869) — французский физик и физиолог.
97

Пуазейля формула
97

Пьезокристалл
— кристалл, обладающий пьезоэлектрическими свойствами.
117, 118, 238

Пьезоэффект
— появление электрических зарядов на поверхности кристаллов при их механической деформации.
117, 129, 260

Р

Радиационная химия
— наука о химических превращениях веществ под действием излучения.
426

«Радиоактивная вилка»
289

Радиоактивное семейство
280

Радиоактивность
— самопроизвольное превращение неустойчивых химических элементов в устойчивые, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или излучением энергии.
267, 275—277, 281, 282, 292

Радиоспектроскопия
191—194, 265

Радиофизика
— раздел физики, в котором изучаются процессы возбуждения, излучения, распространения и обнаружения радиоволн, а также воздействие их на вещество.
175—195

Разрешающая способность
— свойство оптического прибора раздельно передавать или воспринимать мельчайшие детали наблюдаемого предмета; выражается числом линий раздельно различаемых на 1 мм.
201

Рамана эффект
— эффект комбинационного рассеяния света.
214, 215

Рамзай, Уильям
(1852—1916) — английский химик и физик.
331

Реакция химическая
— превращение одних веществ в другие с сохранением общего числа атомов каждого данного элемента.
164, 165, 417—426

Реакция экзотермическая
— реакция, сопровождающаяся выделением тепла.
419

Реакция эндотермическая
— реакция, протекающая с поглощением тепла.
419

Ребиндер, Петр Александрович
(1898—1972) — выдающийся советский физико-химик.
103

Реверберация (послезвучание)
— остаточное звучание, обусловленное отражением звуковых волн.
111

Резерфорд, Эрнест
(1871—1937) — английский физик.
171, 278, 280, 282, 285

Резонанс
— явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении собственной частоты тела с частотой действия внешней силы.
118, 178

Резонансный захват
300

Резонатор
157, 183—189

Рейнольдс, Осборн
(1842—1912) — английский физик и инженер.
98

Рейнольдса число
98, 99

Рекомбинация
— соединение заряженных частиц противоположного знака в нейтральную частицу.
250

Рентген, Вильгельм Конрад
(1845—1923) — немецкий физик.
232, 276, 277

Рентгеновские лучи
— электромагнитное излучение с длиной волны от нескольких тысячных нанометра до 2 нм.
276, 277

Реомюра шкала
— шкала термометра, в которой расстояние между точками таяния льда и кипения воды разделено на 80 равных частей.
520

Рибонуклеаза
— фермент, катализирующий расщепление рибонуклеиновых кислот.
500

Рибонуклеиновая кислота (РНК)
494—497

Рэлей, Джон Уильям
(1842—1919) — английский физик.
331

С

Сверхпроводимость
— явление исчезновения электрического сопротивления, наблюдаемое при низких температурах.
154—156, 274

Сверхпроводники
— металлы и сплавы, у которых при низких температурах исчезает электрическое сопротивление.
238

Сверхтекучесть
— исчезновение внутреннего трения, наблюдаемое у жидкого гелия при температурах, близких к абсолютному нулю.
156, 157, 274

Световое давление
216

Связь химическая
346

Силаны
— химические вещества, являющиеся соединениями водорода с кремнием.
393

Силиконовые резины
— синтетические высокомолекулярные вещества, полученные из кремнийорганических соединений.
481

Синтетические волокна
471

Синхрофазотрон
— установка для ускорения электронов путем многократного пропускания их через высокочастотное электрическое поле.
264

Склодовская-Кюри, Мария
(1867—1934) — польский химик и физик; работала во Франции.
287

Солюбилизация (коллоидное растворение)
451

Сополимеры
477

Сопротивление аэродинамическое
— тормозящая сила, возникающая при движении тела в воздухе.
54

Сорбенты (поглотители)
— см. *Сорбция.*

Сорбция
— поглощение веществ из растворов или газов твердыми телами (сорбентами).
427, 429, 433

Спекание
— получение пористых или компактных твердых материалов из порошкообразных или пылевидных.
455

Спектральная линия
204

Спектральный анализ
— качественный и количественный анализ состава вещества, основанный на изучении спектров испускания и спектров поглощения этих веществ.
182, 203

Специальная теория относительности
28—30

Спин
— собственный момент количества движения элементарных частиц.
261

Спонтанное деление
— самопроизвольное расщепление ядер некоторых тяжелых элементов на два осколка, близких по массе.
291, 382

Спонтанное (самопроизвольное) излучение атома
209

Статистическая термодинамика
149

Стеклопластики
— полимерные материалы, армированные стекловолокнистым наполнителем.
485

Степени свободы
— число независимых типов движения, которые может совершать тело.
43

Стефана — Больцмана закон
148, 169

Суспензия
— взвесь твердых частиц в жидкости.
449

Т

Теория химического строения
462

Тепловой барьер
— предел скорости самолета, выше которой вследствие перегрева из-за воздушного трения резко снижается прочность самолета.
47—49

Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы)
303

Термистор
— полупроводниковый термометр.
249, 250

Термодинамика
121—151

Термодинамический цикл
133

Термопара
— замкнутая цепь из двух разных проводников или полупроводников.
128, 517

Термохимия
— раздел физической химии, изучающий тепловые явления, сопровождающие химические реакции.
136

Термоэлектрогенератор
— полупроводниковое устройство, с помощью которого можно преобразовывать тепловую энергию непосредственно в электрическую.
255

Термоядерные реакции
— реакции ядерного синтеза, происходящие только при высоких температурах.
312—324

Тефлон
— фторорганическое высокомолекулярное соединение.
477

Ток Фуко
— электрический ток, возникающий в проводнике при изменении магнитного потока.
264

Топливный элемент
— разновидность электрохимических источников тока; устройство для преобразования химической энергии в электрическую с помощью реакций окисления дешевых видов топлива.
437—443

Точка Кюри
263, 264

Точка Нееля
264

Трансурановые элементы
— элементы с порядковыми номерами больше 92; получены искусственно.
353—357, 433

Тритий
— сверхтяжелый радиоактивный изотоп водорода с массовым числом 3.
401

Тритон
— ядро атома радиоактивного изотопа водорода — трития, состоящее из одного протона и двух нейтронов.
313

Турбулентность
97

Тяжелая вода
— вода, в молекулах которой вместо обычного водорода содержится его тяжелый изотоп дейтерий.
402—404

У

Углеводороды
473

Углеводы
501, 507

Ультразвук
— не воспринимаемые ухом человека звуковые колебания с частотой большей 15—20 тыс. Гц.
116—121, 260

Умов, Николай Алексеевич
(1846—1915) — русский физик.
107

Унисон
— одновременное звучание нескольких звуков одной высоты.
112

Уравнение идеального газа
124

Уравнение реальных газов
— см. *Ван-дер-Ваальса уравнение*

Уравнение состояния
124, 125

Ускорители (заряженных частиц)
— установки, на которых заряженным частицам (ионам, электронам) сообщают большую кинетическую энергию.
288

Ф

Фарадей, Майкл
(1791—1867) — английский физик.
176, 225, 226, 231, 261, 522

Фаренгейт, Даниель Габриель
(1686—1736) — немецкий физик.
127, 519, 520

Фаренгейта шкала
519, 520

Ферменты
— органические катализаторы сложного строе-

ния, действующие в живых организмах.
459, 492, 505, 506

Ферми, Энрико
(1901—1954) — итальянский физик.
286—288

Ферриты
238, 264, 265

Ферромагнетики
— группа сильно магнитных веществ, которые способны намагничиваться даже в слабых магнитных полях.
238, 264

Флаттер
61

Флотация
— способ обогащения металлических руд.
447

Флюоресценция
— вид люминесценции, представляющий собой свечение тел, возбуждаемое посторонним освещением и продолжающееся 10^{-8}—10^{-9} с после прекращения освещения.
429

Фонон
— квант упругих колебаний тела.
238, 259

Фосфоресценция
— вид люминесценции; явление свечения тел, вызванное посторонним освещением и продолжающееся долгое время после прекращения освещения.
276

Фотон
— квант, «частица» света.
209—213, 218, 219, 249, 269

Фоторезисторы
250

Фотосинтез
426

Фотохимия
— раздел химии, изучающий химические процессы, протекающие под воздействием световых и ультрафиолетовых излучений.
425

Фотоэлемент
— прибор, с помощью которого световое излучение превращается в электрический ток.
256, 257

Фотоэффект
170

Фраунгофер, Йозеф
(1787—1826) — немецкий физик.
206

Фраунгофера линии
— темные линии солнечного спектра.
206

Френель, Огюстен Жан
(1788—1827) — французский физик.
167, 196, 206, 219

Френеля кольца
196

Фреоны
— техническое название группы стойких фтор- и фторхлорорганических соединений, применяемых в качестве холодильных агентов.
389

Фторопласты
391, 477, 482, 483

Фуко, Жан Бернар Леон
(1819—1868) — французский физик.
44

Фуко правило
43, 44

Х

Хитин
— органическое вещество, из которого строится наружный скелет раков, насекомых и т. п.
460

Хлорофилл
— зеленый красящий пигмент растений, сложное гетероциклическое органическое соединение.
426—428

Хроматография
— метод анализа веществ.
426—437

Ц

Цвет, Михаил Семенович
(1872—1919) — русский ботаник и биохимик.
426, 427, 435

Целлюлоза
460, 466

Цельсий, Андерс
(1701—1744) — шведский физик и астроном.
521

Цельсия шкала
— температурная шкала, в которой интервал между точкой таяния льда и точкой кипения воды делится на 100 равных частей.
517

Цепная реакция
288, 424

Циклотрон
381

Циолковский, Константин Эдуардович
(1857—1935) — советский ученый и изобретатель.
25, 26, 66

Циолковского формула
27, 66, 67

Э

Эдисон, Томас Альва
(1847—1931) — американский изобретатель.
115

Эдисона фонограф
115

Эйнштейн, Альберт
(1879—1955) — великий немецкий физик.
16, 28, 29, 170, 173, 174, 197, 216, 219, 262

Электролиз
— химические реакции, протекающие в растворах или расплавах при пропускании через них электрического тока.
220, 439

Электрон
— стабильная элементарная частица с отрицательным зарядом.
221, 224, 267, 269, 272, 523

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР)
265

Электромагнитная индукция
— появление электрического тока в замкнутом проводнике при изменении пронизывающего его магнитного потока.
231, 232, 234

Электромагнитное поле
235, 236

Электроотрицательность
388

Электропроводность
— способность вещества проводить электрический ток, обусловленная тем, что в нем присутствуют подвижные заряженные частицы.
240, 249, 316

Электростатика
— раздел учения об электричестве, в котором изучаются не изменяющиеся во времени электрические поля.
228

Электрохимия
— раздел физической химии, в котором изучается связь между электрическими и химическими процессами.
131, 437—443

Элемент химический
— вид атомов с определенным зарядом ядра.
275—298

Элементарные частицы
222, 226

Эмульсия
— система из двух несмешивающихся жидкостей, одна из которых распределена в другой.
449—451

Энергия активации
— энергия, которой должны обладать молекулы, чтобы осуществилась химическая реакция.
420

Энтропия
— физическая величина, которая характеризует тепловое состояние тела и является мерой вероятности осуществления данного состояния.
144—149

Эрстед, Ханс Кристиан
(1777—1851) — датский физик.
220, 221, 229, 260, 522

Эффект Доплера
— см. *Доплера эффект.*

Я

Ядерная реакция
278, 285, 288, 312, 313

Ядерные силы
223

Условные обозначения и сокращения

А ампер
А/см² ампер на квадратный сантиметр
а. е. м. атомная единица массы
атм. атмосфера
Б бел
в. век
В вольт
вв века
Вт ватт
Вт/м ватт на метр
Вт/м² ватт на квадратный метр
г. год
г грамм
Г генри
ГПа гигапаскаль (10^9 Па)*
г/см³ грамм на кубический сантиметр
Гц герц
Дж джоуль
Дж/м² джоуль на квадратный метр
$\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$ джоуль на моль-кельвин
и т. д. и так далее
и т. п. и тому подобное
кал калория
ккал килокалория
$\frac{\text{кал}}{\text{моль}\cdot\text{ч}}$ калория на моль-час
кг килограмм
кг/м³ килограмм на кубический метр
кгс килограмм-сила
кгс·м килограмм-сила-метр
кгс/см² килограмм-сила на квадратный сантиметр
$\frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{\text{моль}\cdot{}^\circ\text{C}}$ килограмм-сила-метр на моль-градус Цельсия
Кл кулон
км километр
км/с километр в секунду
км/ч километр в час
к. п. д. коэффициент полезного действия
Л. Ленинград (в библиографическом указателе)
л литр
М. Москва (в библиографическом указателе)
м метр
м² квадратный метр
м³ кубический метр
м/с метр в секунду
м/с² метр на секунду в квадрате
мин минута
млн. миллион
млрд. миллиард
МэВ мегаэлектронвольт* (миллион электронвольт)
Н ньютон
Н/м ньютон на метр
ок. около
Ом·см ом-сантиметр
Па паскаль
c скорость света
с секунда
с., стр. страница
СИ Система Интернациональная
см сантиметр
см. смотри
см² квадратный сантиметр
см³ кубический сантиметр
см/с сантиметр в секунду
ст. статья
сут сутки
т тонна
т. том
т. е. то есть
тыс. тысяча
Ф фарада
ч час
эВ электронвольт
э. д. с. электродвижущая сила

°C градус Цельсия
°F градус Фаренгейта
К кельвин

°R градус Реомюра

* См. таблицу дольных и кратных приставок на стр. 524.

Scan- AAW; Processing- waleriy, 2018

Детская энциклопедия

Для среднего и старшего возраста

В 12 томах
Изд. 3

Том 3
Вещество и энергия

544 с. с ил.

03 : 8Ю
Д — 38

Ведущий редактор
РАЗГУЛЯЕВА И. В.

Редактор
ГРОМОВА Г. С.

Специальные редакторы:
НОВИКОВ В. Д.
ТРИФОНОВ Д. Н.
ШАМИН А. Н.

Контрольные редакторы:
АЛЕКСЕЕВ Д. М.
СТЕПАНОВА С. А.
СТОЦКИЙ Л. Р.

Художественный редактор
ИВАНОВ В. С.

Редактор по фото
ПОПОВА А. А.

Младший художественный редактор
ПОНОМАРЕНКО И. Б.

Художественно-технический редактор
КОПНИНА Н. П.

Корректоры:
АНТОНОВА В. С.
ЮДИЧЕВА Т. Ф.

Оформление и макет издания художника
ЖУКОВА М. Г.

Макет тома художника
МОСКВИТИНА И. А.

Художник издания
БЯЗРОВ Д. Г.

Иллюстрации в томе выполнили художники:
БОРОДКИН М. И.
БЯЗРОВ Д. Г.
ВЕРИЖНИКОВ Б. И.
ЗАНЕГИН М. М.
КАНДЕЛАКИ А. Н.
КОШКИН Ю. Ф.
ЛУХИН В. Ф.
НАУМОВ В. Г.
ПАВЛОВ В. С.
ПОПОВ Б. А.
СКОБЕЛЕВ В. М.
ТЕРТЫШНИКОВ А. П.
ТЫКОЦКИЙ Е. В.
ШАРОВ С. А.
ШЕРСТНЕВ В. П.
ЯНКИЛЕВСКИЙ В. Б.

Фотоиллюстрации выполнили:
БРЕЛЬ В. Т.
ГЕРМАН Д. Н.
ЗИМНОХ С. Б.
КОНСТАНТИНОВ И. И.
ЛОГИНОВ Б. В.
МАРКЕЛОВ А. С.
МОСЯКИН В. А.
ПАВЛЕНКО В. П.
ПАПИКЬЯН Р. Т.
ПУШКАРЕВ А. А.
РАСКИН Б. Л.
ЧУПРИКОВ Ю. И.

Издательство «Педагогика» Академии педагогических наук СССР и Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, 107066, Лефортовский пер., 8.
Редакция словарно-энциклопедических изданий.
Москва, 109028, Хохловский пер., 16

Сдано в набор 17/VIII 1972 г.
Подписано в печать 6/VI 1973 г.
Бумага 84 × 108¹/₁₆
Офсетная ГОЗНАК № 1 80 г.
А 10553.
Печ. л. 34. Усл. л. 57,12.
Уч.-изд. л. 66,32
Тираж 520 000 экз.
Заказ 1619
Цена 4 р. 09 к.

Текст набран Ордена Трудового Красного Знамени Первой Образцовой типографией имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, 113054, Валовая, 28

Иллюстрации выполнены и том отпечатан Ордена Трудового Красного Знамени Калининским полиграфическим комбинатом Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Гор. Калинин, проспект Ленина, 5.

OCLC 239-10.

Ар.99к.